巻末付録

特集

チェルノブイリ事故から私たちが学んだこと

はじめに

編集委員会

原子力開発に当たっては安全が最重要な条件であることはいうまでもない。しかし真剣な安全追求の努力にも関わらず万一事故が起こってしまった場合には，技術開発者はその内容からできる限りの教訓をくみ取ってその後に生かす姿勢が肝要である。チェルノブイリ事故は原子力技術開発史の中でも特異的に大きな災害をもたらした。それゆえ，この事故について今の時点で本特集を企画するにあたっても，我々が学んだ教訓を改めて整理し今後の技術開発につなげることに大きな意義がある。このような考えから編集委員会では，本特集の最初の部分でまずは「事故から学んだ教訓」について３つの部会からの見解を紹介することとし，その後に事故そのものの原因分析やその結果，影響などについての解説を配することとした。ぜひこの教訓をご一読の上，後半部分にお進みいただいて，より具体的な内容をお読みいただければわかりやすく有意義であろうと考える

なお３つの部会の見解の中には一部重複した記述もあるが，それぞれ専門を異にする執筆者が独自の立場からまとめられた見解であるのであえてそのままの形で記載することとしたことをお断りする。

特集を始めるにあたって，日本で発電に供されている軽水炉とチェルノブイリRBMK型炉との設計上の基本的な相異を以下に要約して述べる。

(1) 冷却材ボイド反応度係数

軽水炉は熱中性子炉である故に，減速材である水が減少すれば，反応は減少する，すなわち負の冷却材ボイド反応度係数を有している。一方，RBMK炉では，冷却材である水が減少した場合には，水による中性子吸収の減少も相まって，黒鉛減速材の存在ゆえに反応が促進され，結果として冷却材ボイド反応度係数が正という特性を示す。

(2) 格納容器

軽水炉では，冷却材喪失事故に伴う(古典的には反応度事故の結果を考慮)水蒸気の放出・水ジルコニウム反応による熱などを考慮して，これらの保有するエネルギーに耐えつつ放射性物質を格納する堅牢な格納容器が存在する。RBMK炉の格納容器は炉外配管の破断を考慮した部分的なもので，原子炉施設の炉心部分を囲繞する堅牢な格納容器は存在しなかった。

(3) 制御棒効果

軽水炉と異なってRBMK炉の制御棒の先端には黒鉛が付いているので，炉内挿入の初期に中性子を吸収する水が減速材である黒鉛に置換され，出力分布などの条件によっては，いわゆるポジティブスクラムとして正の反応度が添加される。

(4) インターロック

RBMK炉では，正のボイド係数に対する対策は，インターロックよりも運転規則に多くを依存していた。軽水炉では，安全確保にあたっては，できるだけ固有の物理的性質を利用し，さらに，各種のインターロックによって異常事態の発生に至る事態やその進展を防止するとの設計思想を取っている。

2002年 2月1日 受理

I. 核特性について得た教訓

炉物理部会

チェルノブイリ事故は今後あってはならない事故であり，日本(あるいは旧ソ連以外)の原子炉は「大出力チャンネル型原子炉(RBMK)」とは異なるので心配ないという立場ではなく，どのような炉物理的特性によりこのような事故に至ったのか，またこの種の事故を防ぐには炉物理的にどのようなことが望まれるかについて考察したい。

まず，この事故の主要原因の１つは部分的な制御棒挿入による正の反応度添加，すなわちポジティブスクラムである。炉物理特性の重要なパラメータの１つとして，制御棒反応度価値がある。これには制御棒を完全引き抜き状態から完全挿入状態(あるいはその逆)にした場合に加わる反応度である積分反応度と，制御棒の位置に依存した反応度を示す微分反応度とがある。微分反応度は制御棒が時々刻々と動く場合に添加される反応度変化を知る上で重要なパラメータである。RBMK炉では制御棒の先端に黒鉛ディスプレーサが付いており，水が黒鉛に置換されるため，その場所では水による中性子吸収がなくなるので，局所的には正の反応度が加わるものである。RBMK炉のような複雑な制御棒構造に対しては，微分反応度についても十分検討し，必要であればより詳細なモデルによる解析，あるいは実際の制御棒をモックアップした臨界実験を行うべきである。基本的には正の反応度が入りうるような制御棒の設計は不適切である。

制御棒があると中性子吸収があるから負の反応度が加わるという一般的概念はあるが，たとえば反射体の付いていない炉心の周辺に制御棒を配置すると，制御棒を入れている容器の中性子反射効果により正の反応度が加わる場合のあることも知られている。したがって，炉物理的にその反応度が何に基づいているのかを注意深く検討する必要があることを事故から学んだ。

以上，制御棒反応度について述べたが，同様に重要なのはこのような制御棒の特性が過渡特性および事故特性にどのように影響を与えるかを評価すべきであるということである。特に，RBMK炉では減速材である黒鉛の存在によって冷却材ボイド反応度が正になっており，そのような場合の過渡解析は非常に重要となる。ボイド反応度が正となる原子炉は直ちに危険であるというのは行き過ぎた考えであるが，正のボイド反応度を持つ炉心についてはその核特性，過渡特性，事故時の特性を詳細に検討し，炉の安全性を十分評価しなければならない。

また，運転モードや出力特性により炉の制御が不安定，困難となることが無いか，きめ細かく評価するべきである。

以上まとめると，チェルノブイリのような事故を二度と起こさないためには，炉物理的に基本的な次のことを守らねばならない。

1. 新しい設計に対してはその炉物理的特性を詳細に検討し，必要であれば臨界実験によりデータを取り特性を把握すること。もっとも，RBMK炉の設計に先立って臨界実験は当然行われたであろうが不完全であったと思われる。
2. 安全性に関連する炉物理的パラメータの変化するすべての領域にわたって過渡解析によりその影響を評価すること。
3. 反応度係数が正になる場合がある原子炉に対しては，特に注意してその影響を詳細に検討すること。
4. ポジティブスクラムについてはその重要性が認識されていたにもかかわらず対策が講じられなかったという。なぜそうであったのかについては様々な要因が考えられる。しかし，これが事故の重要な引き金になったことを考えると見過ごすことはできない。重要性の認識のレベルが不十分であったのか，あるいはこれが改良に活かされない他の要因があったものと推定できる。そこには炉物理分野に限らない普遍的な教訓が潜んでいると思われる。

以上の点は基本的なことであり，事故から15年経った今でも原子炉の設計・運転にあたっては基本に戻り，炉物理的な観点から原子炉の安全性を十分に検討することが必要であると強く感じる。

（工藤和彦，竹田敏一，中川正幸，山根義宏）

II. 我々は何を学んだのか

原子力発電部会

1. 過ちや失敗を避けるための仕組みづくり

人類の知恵と想像力には自ずと限界があるので，失敗や過ちを起こさないために，人々は普段からいろいろと心がけている。工学施設の設計と運用にあたっては，「施設の挙動とありうるリスクをあらかじめ考えておく」，「未知の領域に踏む込む場合には警戒する」だけでなく，「他者を含めて経験に学ぶ」，「他者の批判を受け入れる」，「考えていないことにも対応できる余裕をあらかじめもたせておく（robustness）」などなどである。

こうした当たり前の事項が当たり前のこととして考えられておらず，「他者の批判を受け入れる」仕組みのない社会体制のもとで独自の考え方による設計が進められた結果の1つが，チェルノブイリ事故である。西側の社会では規制当局による認可が困難と見られる原子炉（正のボイド係数が適切に制御される手段を伴わないで原子炉運転領域の一部に存在すること，部分格納容器であること，ポジティブスクラムを伴うゆっくりと作動する制御棒，など独特の特徴を備えた設計）を設計建設運転できる環境は，国際社会の批判から距離を置く壁の中ゆえに存在しえたのであろう。例えば，同様に正のボイド係数を有するMarviken（スウェーデン）やGentilly-1（カナダ）は，蒸気過熱方式問題から建設したものの運転前に断念[1]，あるいは運転開始早期に安定性問題を生じて最後は運転放棄に至っているが，正のボイド係数を有する炉に関する国際的な批判も関わりがあると言われている（なお，同じく重水を用いる「ふげん」ではMOX燃料の採用によりボイド係数を負にしてこの問題を回避[2]）。しかし，当時国際社会の中で旧ソ連に，RBMK型炉をレビューして意見を出していたのはイギリスに限られていたようである。それどころか，旧ソ連国内においては，多数の専門家を交えて設計を批判的に検討し安全に関する意志決定を行う仕組みがなく，RBMK炉の設計は国内安全基準を満足しないにもかかわらず認可されたと，後になって旧ソ連自身が報告している始末である[3]。

このように相互に意見を言い合い，改善のための示唆を出し，教訓を分かち合う仕組みを整備する具体的方策は，事業者側では世界原子力発電事業者協会WANOの設立（1989年），IAEAの下ではやや性格を異にするが国際安全条約であった。WANOの下で，事業者は相互に交換訪問，良好事例の交換，ピアレビュー等の活動を行っている。国際原子力安全条約は，1991年にIAEAが提案し，我が国は1995年に締結，翌年発効している。安全条約の下に，各締約国は，各国における原子炉の安全確保体制等に関し3年ごとに報告書を提出し，条約国会合で加盟国相互

のレビューを受けるが，こうした活動を通じて旧ソ連，東欧諸国の原子力発電所の安全性確保と向上が意図されている。

このような過ちや失敗を避けるための仕組みづくりは，国際間の枠組みだけでなく，原子力を運営する組織内部における監査システムあるいは相互の間での活発な意見交換システムを機能させることで確保すべきなど，以下の安全文化ほかの項目にも関わる教訓がここにある。

2．安全文化

チェルノブイリ事故の処理作業を指揮したレガソフ氏（クルチャトフ原子力研究所副所長）の自殺と氏の残した回想録[4]は，衝撃的だった。回想録で氏は，原子力に関わる人の責任感の欠如・規則遵守姿勢の欠如・専門家の軽視など組織運営体制の欠陥と安全軽視の姿勢を描き，「チェルノブイリ事故は，何十年にもわたって我が国で行われてきた社会と経済の運営におけるすべての誤りが達した終着駅」と語り，社会体制とその反映としての原子力運営組織体制の病根が明かされている。発電所では，事故の引き金となった試験の手順書も専門家の意見を聞くことなくその場で易々と変更され，試験開始前に原子炉が置かれている極めて危険な状態が認識されていないなど，慢心・警戒心の不足・安全軽視という組織風土があった。

組織事故に分類される事故は，組織内の当事者には過ちが認識されず，結果として個人の過誤による事故よりも重篤な結果を招くことは，つとに指摘されるところである（リーズン[5]，畑村[6]）。この点に関して，謙虚な姿勢で経験に学ぶ・独立した監査機構の設置・常に安全を優先する，などの原子力運営の組織と個人に必要とされる安全文化と安全意識の重要性を示したのがINSAG-4[7]であり，原子力運営組織ではこれに照らして現在を省みるシステムが運用されているところである[8]。個人の問題は，文化というよりも倫理の問題として，チャレンジャー事故以来盛んに論議され[9]，工学教育の場でも取り上げられてきている。

3．専門家の不在と俯瞰できる人の不在

組織安全文化に関する事項だがINSAG-4にて十分明示的に示されているとは思えない事項に，専門家の不在と俯瞰できる人の不在がある。よく知られているように，事故の直接の原因であるタービンの回転慣性による非常用電力供給試験は，炉物理の専門家の事前了解を得ていなかっただけでなく，試験開始前の初期条件のめまぐるしい変化にも関わらず，炉物理の専門家は試験の場にいあわせなかった。「原子炉なんてサモワールのようなものだ」[4]という風土の下で専門家の意見は軽視され，施設を管理する組織の長に全体を俯瞰できる能力あるいは少なくとも各分野の専門家でチームを構成すべきとの意識が欠けていた。原子力施設の運営に必要なのは，電気機械だけではなく，炉物理・放射線管理さらにはヒューマンファクターなど多数のdisciplineであるところ，これら知識を幅広く体得することなく施設の運営にあたる人は，自らの狭いdisciplineの中で判断しがちである。個人の能力を高め同時に，組織構成の中に多数のdisciplineを擁してその意見を尊重する仕組みが必要である。

4．運転員の規則遵守のみに依拠しない安全確保

チェルノブイリ事故では設計の問題だけではなく多重の規則違反があったとのINSAG-1の指摘は，その後，実はそのうちいくつかは違反ではなく許容されていたとINSAG-7で修正された。手順遵守すらおぼつかない組織風土の下で安全確保の拠り所を手順遵守に委ねることには，電気機械系と人間系に関する重大な問題がある。ECCS待機解除が容易に許容され，原子炉保護系待機解除にも抵抗感がないなど，大きな自由度を運転員に与えたことは問題である[11]。旧ソ連はRBMK炉の設計において，機械による自動保護よりも人間による操作の方に信頼性をおく設計思想を取っていた[12]といわれている。正のボイド係数に対する対策は，インターロックよりも運転規則に依存していた。安全を重視せず，「規則を守らぜるのには大論争が必要だった[4]」環境には最悪の設計思想であった。電気機械系と人間系の一方に大きく寄りかからず，それぞれが安全保護システムを相互補完的にあるいは重複して有することが大切という設計思想に関する教訓がここにある。安全確保の拠り所を手順遵守に委ねながら，教育訓練と警戒心の不足で手順が守られないとどのような事態に至るかは，当該事故以外の重大な事故でも認識するところである。

5．前兆事象のレビュー

制御棒挿入に伴う反応度投入効果が事故に果たした役割については異なる見解も出されているが，INSAG-7においては，すでにLeningrad（1975），Ignalia（1983）の2つの原子炉で，この設計に起因する問題を生じ，設計および手順書変更が検討されたが，徹底性を欠いていたと記している。事故トラブルを徹底的に調べ，これから学ぶ姿勢が大切なことは，TMI前兆事象と言われるDavis Besseの給水過渡事象についても同じであった。

6．リスクの評価と過酷事故に対する事故管理

ラスムッセン報告が公開されたのは1975年だが，その後確率論的安全評価（PSA）を用いて原子炉施設の安全性を定量的に把握すること（脆弱性があるとすればどこか・どこをどう改善したら安全性が高まるか・原子炉事故はどの程度起こりにくいのかなどを把握すること）は，費用対便益分析等を巡る報告批判の故に直ちには一般化しなかった。TMI事故の後，TMI事故そのものはイベントとして解析されていないまでも小破断LOCA・過渡変化・人的過誤の重要性は的確にPSAにて示されていることから，PSA活

用の有用性に再び目が向けられた。旧ソ連で定量的なリスク評価の無かったことはレガソフ回想録にも記されている。RBMK型の格納容器は冷却材主配管の破断による蒸気を閉じ込める部分格納系で，炉心部分も圧力管の破断相当の蒸気を閉じ込める部分格納系でしか囲繞されていなかった。おそらくは運転中の燃料交換という効率化のために局所最適の発想でつくられ，反応度事故発生の可能性を工学的に排除した上での格納施設設計ではなかった。決定論的評価が一部の専門家の主観的な判断によって形成される状況の下で，この評価のみに依拠した設計では，こうした脆弱性は見落とされる可能性がある。すでに米国では，TMI事故の後に安全目標の策定にも関連しPSAの積極的活用に向けて計画が進められてきたところであるが，チェルノブイリ事故を経て定量的リスク分析と過酷事故対応の動きが加速されたとみられる。個別の発電プラントについてPSAと格納容器の過酷事故時の耐性評価を実施し(Individual Plant Examination)，あわせてこの過程を通じて脆弱性を克服する手段を認知し設備/手順書を用意して設計ベースを超えた事態に対処する事故管理(Accident Management)方策を整備することは，米国を初め[13]，日欧でも80年代末から90年代を通じて取られた施策で，リスク低減に大いに寄与してきた[14,15]。

7. 事故に国境のないこと

事故は西側社会ではスウェーデンの原子炉施設で初めて検知された。仮にソ連より早期に事故情報が周辺国に通知されていれば，例えば東欧での牛乳摂取に制限を課す緊急時計画の早期発動もでき，リスク軽減に役立ったはずである。さらに，事故をおこした原子力施設をもつ当該国以外の国が事故で被った損失は誰が補塡するべきかに関して，国際的取り決めがないことも理解された。この経験から国際的な仕組が，IAEAによる略称「原子炉事故通報条約」(1986年発効)，「原子炉事故援助条約」(1987年発効)，「原子力災害の補完的補償条約」(未発効)として整備されてきている。国際的な安全設計基準等の分野では，IAEAがシビアアクシデントの扱いを設計等の安全基準文書で示し，次世代炉設計において考慮すべき事項に入れるといった，教訓を今後に活かすための活動が行われてきている[16]。

8. 最 後 に

日本ではRBMK炉のような設計は認可されなかったであろうし，旧ソ連とは社会の仕組みにおいても，その中にいる個人の安全に対するモチベーションにおいても，大きな隔たりがあったといえるだろう。しかし，安全性確保の努力に終着点はない。他山の石として学ぶべき所は学ぶ姿勢を持ち，安全性向上に向かって常に努力することは重要である。

チェルノブイリ事故からの最も重要な教訓は，国家を含めた組織における安全文化の問題であろう。安全文化に関するINSAG-4の抽象化された文書は，INSAG-7に示される実際的問題やレガソフ回想録に示される省察を通じて見ることで一層理解されると思われる。チェルノブイルといえば，「設計の相違」と「安全文化」を教科書的に思い起こすのではなく，15周年を契機に具体的な事実に照らして教訓を考えることで，我々がここから他山の石として学ぶべきことが一層見えてくるものと思われる。

(尾本 彰)

——参 考 文 献——

1) W. マーシャル，原子炉技術の発展，筑摩書房，485～499.
2) 動燃10年史，233 (1978).
3) IAEA, 75-INSAG-7 Annex I SCSSINP report, (1992).
4) Legasov, "My duty to tell this", Pravda, May 20, (1988).
5) J. リーズン，組織事故，日科技連，327 (1999).
6) 畑村ほか，機械創造学，丸善，154 (2001).
7) IAEA, 75-INSAG-4, (1991).
8) Omoto, Utility's activities for better safety culture after the JCO accident, ANS/AESJ topical meeting, June (2001).
9) ハリス，他，科学技術者の倫理，丸善，(1998).
10) 畑村，失敗学のすすめ，講談社，210 (2000).
11) USNRC, Implications of Accident at Chernobyl, April, (1989).
12) 原子力安全委員会，ソ連原子力発電所事故調査報告書.
13) USNRC, Generic Letter 88-20, "Individual Plant Examination for Severe Accident Vulnerabilities", (1988).
14) OECD/NEA, "Sevee Accident Management—Prevention and Mitigation—", (1992).
15) 安全炉安全基準専門部会，発電用軽水炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネージメントについて，(1992).
16) 平野光将，他，IAEAの国際安全基準に関する活動，原子力誌，**42**〔10〕，994 (2000).

III. 得られた教訓と社会・組織研究への発展

ヒューマン・マシン・システム研究部会

1. はじめに

15年前に発生したチェルノブイリ事故は，旧ソ連最後の書記長であるゴルバチョフ大統領にグラスノスチ(情報伝達と公開)を決断させ，情報の公開と情報共有の重大さを示すとともに，組織としての意思決定や管理など組織要因の与える影響の大きさを全世界に警告した出来事であった。当時，事故の主席調査官であるバレリ・レガソフ(Valeri Legasov)は，1986年9月，ウィーンのIAEAで開催された国際会議の席上で，事故の原因は運転員のエラーと規則違反であるといいきった。しかし，2年後の1988年4月，彼はアパートのバルコニーで自殺したが，「チェルノブイリ事故について，私は明確な結論を下した。それは，何年もの間，打ち続いた我が国経済政策の貧困がこの事故

を引き起こしたということである[1)]」と自らの思いをテープレコーダーに託した。

次第に，技術的側面に影響を与える社会・組織研究(Socio-technical study)の重要性が認識されるようになり，事故調査を中心的に進めた国際原子力機関(IAEA)は，INSAG-4において組織における安全文化(セーフティーカルチャー)の重要性を提唱し，次のように定義した[2)]。「……安全に係わる諸問題に対して最優先で臨み，その重要性に応じた注意や気配りを払うという組織や関係者個人の態度や特性の集合体」。また，英国HSEは1993年，さらに具体的アクションに踏み込み，「組織の安全文化とは，組織の健全性・安全性プログラムへの参画，および形式と効率を決定する個人とグループの価値観，態度，能力，行動パターンから生まれるものである。ポジティブな安全文化を持つ組織は，相互信頼に基づいたコミュニケーション，安全の重要性に関する共通した認識，予防対策の有効性を確信することによって特徴づけられる」と定義している[1)]。

このような背景のもと，ヒューマン・マシン・システム部会では，チェルノブイリ事故の背景をヒューマンファクターの観点および社会技術的観点からこれまで得られた情報を整理し，得られた教訓を抽出した。また，それが今日にどのように生かされているかの視点から検討した。

2．チェルノブイリ事故の背景要因

チェルノブイリ事故では，当初，6あるいは7つの違反がこのような惨事を引き起こしたとされたが，INSAG-7では見直され，そのうちいくつかは明確な違反ではなかったことが明らかにされた[3)]。運転員個人やチームレベルの違反ではないにしても，結果的に大惨事に至った事故の背景要因を「設備」「人(チーム)」「組織管理」「社会」の観点から見つめることが必要であると考えた。**第 Ⅲ-1 表**に問題点を操作上および運用上の問題点に分け，その背景要因を整理した[3~6)]。その結果，設備上の問題点も散見されるが，多くは「人(チーム)」やその上流に位置する「組織管理」の要因に帰着することが再認識された。

(1) 反応度余裕が規定値を上回った

反応度操作余裕(ORM)値を低下させた主因には，運転員がその値の重要性を理解していなかったことが挙げられる。この背景には，教育不足，訓練用シミュレータが設置されていないなど社会情勢に起因する欠陥が影響している。JCO事故においても臨界教育の欠如が指摘され，共通要因となっていることに改めて気が付く。

第 Ⅲ-1 表　チェルノブイリ事故の問題点とそれに関連した4つの側面(設備，人，組織管理，社会)

問題点	設備	人（チーム）	組織管理	社会
操作上の問題点				
反応度余裕が規定値を下回った	ORM 値を簡単に確認できない構造だった	ORM 値の重要性を理解していなかった	炉特性について十分な教育がなされていない	経済的に困窮していた
試験計画を下回る出力で実験を強行した		ゼノン毒により出力維持・制御が困難な状況で実験継続を判断した	訓練用シミュレータが設置されていない	反応度事故に対する規制側の安全評価が不十分であった
		手動制御による出力調整の負担が大きかった	機械よりも人間による制御に重点を置く設計思想であった	ウクライナの設備余裕率が逼迫していた
		運転員がその場で試験条件を変更した	実験開始時にキエフ指令所から発電続行の指示があった	電力不足により生産性優先の圧力があった
		試験実行の命令を忠実に守ろうとした	低出力で運転を禁ずる規則がなかった	
		金曜夜勤の試験であり早く終了したかった	今回失敗すれば次のチャンスは一年後だった	
		失敗しても次の実験を行えるようにした	上下関係が優先し批判精神が失われていた	
運用上の問題点				
ポジティブスクラムに対する対応がとられていなかった	負の反応度が投入されるまで時間が掛かるシステムであった	実験の主体である電気技師はトラブルの経験がなく、安全性に対する配慮が不足していた	低出力の危険性を示す前兆事象があったのに対策を取らなかった	事象に基づく規制が機能していなかった
正規の手続きや発電所全体の合意なしに特殊試験を実施した		実験グループの電気技師は実験遂行により、炉心に影響が及ぶことを理解していなかった	試験の安全確保上の検討が不十分であった	組織間・組織内の情報が伝わらない体制であった
			チェルノブイリ発電所は優秀なプラントであるとの慢心があった	原子力では事故が起こらないと規制当局・政府が宣伝していた
			所長には実験の詳細が知らされていなかった	
			国の検査組織のメンバーが不在であった	
			原子炉の専門家でないものが実験を指揮する体制であった	

「教訓 1：安全性に関連する潜在的リスクに対する教育・訓練の徹底」

また，計画とは異なる状況が発生したことによる運転員の負担増，ヒューマンマシンインタフェース(HMI)の不備も影響している。この背後には，過度に人間への役割分担を求める設計思想や技術的貧困が認められる。

「教訓 2：人間への負担軽減や危険を察知させる観点からのHMI設計」

(2) 試験計画を下回る出力で実験を強行した

試験計画とは異なる低出力状況に陥っても，実験を強行した主因は，試験実行の命令を忠実に実行しようとした運転員の態度が挙げられる。この背景には，低出力の継続を禁ずる明確な規則がなかったこともあるが，しばしば変わる給電指令など状勢変化への対応の慣れ，上位の命令には無条件で服従する風土などが挙げられる。JCO事故においても効率優先のためのステンレスバケツの使用を製造部長が追認していたことなど共通要因と考えられる[7]。また，起こった事象のみならず，考えられる潜在的リスクを常日頃から洗い出し，それに対する備えを怠らないことも一歩進んだ安全管理という観点から必要である。これが実現されていれば，危険な手順や状況を事前に察知し，規則として禁止することも可能であったかもしれない。

「教訓 3：安全確保の障害となるような指示・命令には従わない風土醸成」

「教訓 4：潜在的リスクを閉じ込めるための規則・設備の整備」

次に，運転員がその場で試験条件を変更できたことも大きな問題である。ゼノン蓄積により，当初の試験条件が満たされないにも係わらず，安全性評価が行われない状況で試験が続行されたことである。JCO事故においても沈殿槽での撹拌を許可したことに対応すると考えられる。この背後には，生産性優先のためには運転操作の変更許可や審査などの管理がおざなりになるような風土が形成されていたことが考えられる。

「教訓 5：生産性圧力に屈しない許可・承認を必要とする強固な管理システム」

また，チェルノブイリ原子力発電所は運転成績が優秀なプラントであり，試験を担当した電気技術者を始め運転員など職員のインセンティブが高く目的遂行指向が強かった。これにより，危険に対する感覚が低下したことが試験の強行につながったと考えられる。

「教訓 6：安全意識が欠如した状態での職務遂行意識の高さはむしろ危険であることを理解させる教育」

(3) ポジティブスクラムに対する対応がとられていなかった

ポジティブスクラムについては，その前兆の事象が2ヶ所で発生しているにも係わらず，何の対策も取られていない。この背景には，組織あるいは国家として不都合なことは隠蔽するという体質が感じられ，当局も不具合箇所を改善させるという有効な規制を実施していなかったことが挙げられる。これらには，原子力では事故が起こらないと規制当局や政府が宣伝していたこと，および当時のソ連の経済的疲弊も影響したと思われる。

「教訓 7：発生した事象から学び，それを教訓として広く対策を徹底できる体制」

「教訓 8：事故は起こらないという幻想を捨て，情報公開に基づく有効な規制」

(4) 正規の手続きや発電所全体の合意なしに特殊試験を実施した

特殊な試験を炉心への影響を検討・評価せずに実施したことの直接の原因は，炉心特性にうとい電気技師のグループのみで試験を計画し，実行したことである。しかしながら，所長にはその詳細が知らされていないこと，検査機関のメンバーが不在であったことを考えると，組織内での情報の伝達やコミュニケーション，さらには，組織内のセクショナリズムの問題が背景にあるものと考えられる。

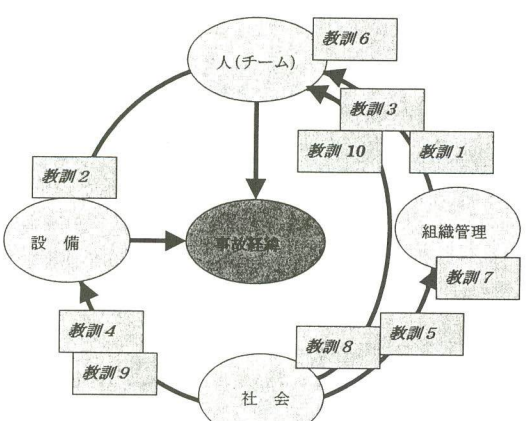
「教訓 9：新たな試験・改良には多角的な検討を行う管理システム」

「教訓10：組織のセクショナリズムを排し，情報伝達・コミュニケーションを促進する活動」

以上，認識された10個の教訓と事故に関連した4つの側面(設備，人，組織管理，社会)との関係を模式的に**第 Ⅲ-1 図**に示す。

3. チェルノブイリ事故の教訓から学んだことおよびその対応

上記のチェルノブイリ事故の背景および得られた教訓に述べた通り，ソ連自身はもちろんのこと，欧米各国も，様々な取組みを開始した。最大の教訓であった「過去事象に学ぶこと」「情報交換の活発化」を国際レベルで促進するため，事業者サイドではWANOによる原子力発電運用技



第 Ⅲ-1 図 認識された10個の教訓と事故に関連した4つの側面(設備，人，組織管理，社会)との関係

術に関する情報交換，相互評価（ピアレビュー），良好事例紹介など情報ネットワークを駆使した活動を開始した。また，規制サイドでは，IAEAが実施主体となり，発電所訪問による運転管理調査チーム（OSART），重要事象評価チーム（ASSET），セーフティカルチャー評価チーム（ASCOT），国際規制レビューチーム（IRRT）などを発足させ，東欧諸国を中心に活動を強化している。また，国内においても，ヒューマンファクターに関連する研究を強化するため，民間側として，東京電力，電力中央研究所に，国側も原子力発電技術機構，日本原子力研究所に専門部署が設置された。欧米諸国では，チェルノブイリ事故の反省から，安全性と組織要因（例えば，規則遵守の風土，コミュニケーションの重要性など）の関係に係わる研究が鋭意進められることとなったが，我が国において，これが本格的に認識されたのは，JCO事故以来であり，その意味でチェルノブイリの教訓を十分活かしきれなかったのは残念であった。しかしながら，JCO事故以来，組織における安全文化の醸成が急務であるとの認識が高まり，民間側にNSネットが独立した組織として設立され，原子力施設の安全文化の醸成に係わる様々な活動が開始された。一方，国側では，きめ細かな規制という立場から原子力保安院が設置され，原子力施設全般を対象に検査・監視体制を強化した。

これらの調査研究が進展することにより，潜在的リスク（ハザード）を内包する諸施設について，教訓に述べたような組織要因を含めた安全文化のレベルを事前評価できる可能性がある。この事前評価がうまく機能し，監査やレビューによる指摘結果を適切に自らの組織へ反映できれば，チェルノブイリ事故やJCO事故を未然に防止できた可能性が高い。現実にシェルなどの石油化学プラントでは，事前評価ツール（Tripod-Delta）を導入し，自主的に組織自体の安全性向を確認している。ヒューマンファクターおよび安全文化の研究はこのような枠組みを提供することも大きな使命である。

（高野研一，内藤憲夫，古田一雄）

――参考文献――

1) Reason, J., Managing the risk of organizational accidents, Ashgate, Aldershot, (1997).（組織事故，監修：塩見，翻訳：高野，佐相，日科技連，1999））
2) IAEA, Safety culture, Sefety Series 75-INSAG-4, (1991).
3) IAEA, The Chelnobyl accident：Updating of INSAG-1, Safety Series 75-INSAG-7, (1992).
4) 原子力情報センター，チェルノブイリ事故に関するファクトシート，(1985).（英国産業会議作成）
5) 原子力安全委員会，ソ連原子力発電所事故調査特別委員会，ソ連原子力発電所事故調査報告書，(1987).
6) N.A. Steinberg, *et al.*, USSR State Committee for the Supervision of Safety in Industry and Nuclear Power, (1991).
7) 高野研一，組織事故としてのJCO臨界事故と再発防止，安全工学，**39**〔4〕，(2000).

特集

チェルノブイリ事故から15年
私たちが学んだこと

Fifteen Years after the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant —Lessons Learned—

チェルノブイリ原子力発電所の事故から今年で15年が経過した。この事故は，世界，とりわけ欧州での反原子力の流れを決定的なものとし，関係者の間では忘れることのできない痛恨の出来事となったが，一方では，この事故から学ぶべきことは現在でも少なくない。事故発生直後は旧ソ連の政治体制に阻まれて，十分な情報を得ることができなかったが，旧ソ連崩壊以後，様々な方面での研究が進められ，多くの重要な知見が得られてきている。事故発生から15年を経て，私たちはこの不幸な出来事から何を学んだのか，今一度きちんと振り返り，今後の原子力安全，放射線障害防止への糧としたい。

Ⅰ．まえがき，　Ⅱ．事故シナリオ再検討，　Ⅲ．RBMK型原子炉の現状，　Ⅳ．事故現場の今，
Ⅴ．事故の医学的影響，　Ⅵ．事故後の環境影響，　Ⅶ．あとがき

Ⅰ. まえがき

㈱原子力安全研究協会　佐藤一男

1986年4月26日，旧ソ連(現ウクライナ共和国)のチェルノブイリ原子力発電所において，原子力の歴史上未曽有の事故が発生してから，今年で満15年経過した。早いものだという感想もあろう。しかし，この事故が起こした波紋はまだ完全には収まっていない。それどころか，そのいくつかはあまり目立たないところで，依然として重要な課題を我々の上に残しているのである。

それにしてもこの事故の前後から今日までの15年間，世界はかつてないほどの変動を経験した。その最たるものは，ソ連の崩壊と冷戦の終結であろう。この事故の少し前，ゴルバチョフが共産党書記長となり，ペレストロイカとグラスノスチを掲げて体制の変革に着手した。

現在の目でみると，少なくともチェルノブイリ事故の当時は，体制変化の兆しは様々なところに現れていたものの，それは不徹底で不完全なものであったといえよう。

1986年8月，ソ連は，ウィーンで開かれたチェルノブイリ事故に関する国際会議で，この事故についての報告を行った。この事故以前には，原子力に限らず，ソ連の国内での事故や災害について，国外はもとより国内にも公表されたことは極めて稀だった。したがって，このウィーン会議でのソ連の報告は，当時としてはまさに画期的なものであったのである。

このソ連の報告の概要は，IAEA INSAGの報告書(INSAG-1)に記載されている。しかし，このソ連の報告は，到底真実のすべてを述べたものとはいえず，その一部は事実をゆがめ，隠蔽したものであったことが時とともに明らかになった。報告がそのようになった理由の少なくとも一部は，ソ連の「国威」を守るという旧体制的感覚であって，この事故の痛恨の教訓によって，ソ連の，そして世界の人々の安全と幸福に貢献しようという感覚は甚だ希薄だったといえよう。

その後，この時のソ連の報告では隠されていた様々な事実が明らかになってきた。これを受けて，INSAGは以前のINSAG-1を改定し，この事故の技術的な意義を再評価したINSAG-7を1992年に公表した。そしてこれが，この事故の原因と経過に関する技術的な分析と評価のいわば決定版になっている。この事故の教訓を正しくくみ取るためには，まずこのような文書によって，事実を正しく理解するところから始めなければならない。

だが，この事故の意義は，事故の技術的分析などに止まらず，より広い視点に立つ必要があろう。この事故の根本的な原因は，旧ソ連の原子力開発利用全般に見られる安全の軽視あるいは無視，それによってもたらされた技術と規制の空洞化，職場規律の弛緩など，一言にしていえばセーフティ・カルチャーの欠如であったことは，広く認識されているところである。そして，これこそが，チェルノブイリ事故の最大の教訓である。すなわち，安全確保には，安全に最高の優先度を与え，高い安全の意識をすべての関係者に行き渡らせ，そしてこれを組織的に育成し発展させることが不可欠であることが，世界共通に認識となったのである。

我が国においては，セーフティ・カルチャーは国際的に見ても高い水準にあると思われていた。だが，特に近年現れたいくつかの不祥事では，安全の意識の風化，組織と技

2001年 10月1日 受理

術者の倫理の頽廃などが顕著に見てとれる。もしこれが日本の原子力，あるいは日本全体を覆っている風潮であるとしたら，まさに由々しきことといわねばなるまい。これを克服し，科学技術の正しい姿を取り戻すことは，我々にとって喫緊の課題なのである。

チェルノブイリ事故も時がたつにつれて，事故発生当時の衝撃は次第に薄れてきたように思える。事故後15年を経た今日，もう一度あの事故の苦痛に満ちた経験を思い起こし，心を新たにしてセーフティ・カルチャーを高め，安全確保に万全を期していかなければならない。

II. 事故シナリオ再検討

本当は何が起こったのか？ それは何故起こってしまったのか？

㈱東芝 安藤正樹，
日本原子力研究所 平野雅司

チェルノブィリで何が起こったのか？ それは，何故起こってしまったのだろうか？ 本章は，その疑問に対して，現在わかっていることをまとめたものである。

事故当初，事故原因は「運転員の規則違反」とされたが，その後，それを否定する事実が次々と明らかになってきた。また，事故後，シェルタ内の調査が進むにつれ，事故がどのように進展したかの推定ができるようになり，当初の認識を修正しなければならないものも出てきた。ここでは，以下のような，これまで比較的知られることの少なかった情報に重点をおいて解説し，原子炉の暴走に至るまでの事実関係並びに事故原因，暴走後の事故の進展について検討する。

- 運転員の規則違反が主原因ではなかった
- 事故以前にも類似の事象が経験されていたが，その教訓が生かされなかった
- 設計，運転手順書，安全規制などにかかわる問題点こそが主原因である
- 事故終息のため実施されたヘリコプタからの投下物質はほとんど炉心内に到達していない
- 燃料は溶融し周りの物質と反応してセラミック状になって固化している

チェルノブイリ事故は，我々にとっても学ぶべき教訓を多く含んでいる。また，シェルタ内の調査は十分ではなく解明すべき点は多い。さらに，研究を進めていく価値があるのではないだろうか。

1. 原子炉の暴走に至るまで

(1) はじめに

事故の発生から4ヶ月後の1986年8月25日から29日にかけて，国際原子力機関(IAEA：International Atomic Energy Agency)主催の事故後評価会合(Post-Accident Review Meeting)が開催され，当時のソ連政府の専門家から事故時のプラントデータや解析結果を含む事故の詳細が報告された[1](「ウィーン報告」と呼ぶ)。同会議では，よく知られているように，事故の第一義的な原因は「運転員による6つの規則違反」にあると報告された。同年9月，IAEAの国際原子力安全諮問グループ(INSAG：International Nuclear Safety Advisory Group)は，IAEA事務総長の諮問を受け，同会合で得られた情報と将来に向けた提言について，報告書INSAG-1[2]に取りまとめた。我が国の原子力安全委員会も2編の報告書[3,4](「安全委報告」と呼ぶ)を出したが，これらは主にウィーン報告に基づいたものであった。

その後1990年頃より，当時のソ連では情報公開(グラスノスチ)の流れの中で同事故の原因についての研究が本格的に始められ，幾つかの報告書や論文が公開された。まず，1990年7月には，ソ連産業原子力安全監視委員会の「決定」と呼ばれる未公開文書が新聞等で取り上げられた[5]。これに引き続き，1991年1月には同委員会の科学技術評議委員会から報告書[6]が公開された。これは，同委員会議長の名前から「シュタインベルク報告」と呼ばれており，ウィーン報告以後に出された報告書の中で最も重要なものの一つと考えられている。これらの報告書では，「事故の主要因は制御棒の欠陥(「ポジティブ・スクラム」と呼ばれている)にあり，事故の原因とされてきた運転員の規則違反は，実際には違反ではなかったか，または，違反であったとしても事故の進展には無関係であった」というものであった。

これを契機として，1991年4月には，フランスと旧ソ連原子力学会の共催で国際会議「原子力事故とエネルギーの将来」(「パリ会議」と呼ぶ)が開催され，旧ソ連よりチェルノブイリ事故に関する2件の論文が報告された(「ボルショフ論文」[7]，「アダモフ論文」[8]と呼ぶ)。ボルショフ論文の著者には，上記委員会議長シュタインベルクも含まれている。

その翌年の1992年，INSAGは，ウィーン報告以降に得られた情報のレビューを基に事故原因の再評価を行い，INSAG-1の改訂版であるINSAG-7[9]を刊行した。INSAG-7では，レビューに際し最も重要な情報源であったものとして，シュタインベルク報告および旧ソ連の専門家グループの報告書(「アバギャン報告」[10]と呼ぶ)を付録として掲載している。ただし，アバギャン報告は，前述のパリ会議でのボルショフ論文と同一のものである。

以下，主として上記の文献を基に，運転員による規則違反とポジティブ・スクラムの評価に焦点をあてつつ，議論の流れの再構築を試みる。なお，INSAG-7以降，事故原因に係わる重要な論文は出されていない。新聞やテレビでも報道された「地震起因説」[11]については，本稿では議論の対象としない。また，事故原因について検討するに際して，参考となる文献として，ソ連誌ノーブイ・ミール(新世

界)の1989年6月号に掲載された「チェルノブイリ・ノート」(訳書名「内部告発」)[12]を挙げることができる。さらに，事故当時チェルノブイリ発電所の副技師長であったジャトロフが，約4年間の懲役を終え，報告書INSAG-1への批判をこめてINSAGに寄せた書簡[13]が公表されている。ただし，本書簡に含まれる主な技術的情報はシュタインベルク報告に記載されているため，本章では取り上げない。

(2) 事故の経過

第 II-1 表に，シュタインベルク報告に示されている事象の推移を示す。これは，アバギャン報告のものとほぼ同一である。また，何ヶ所か新しい情報が加えられたり，変更が加えられたりしているが，全体としてウィーン報告のものと大きな相違はない。

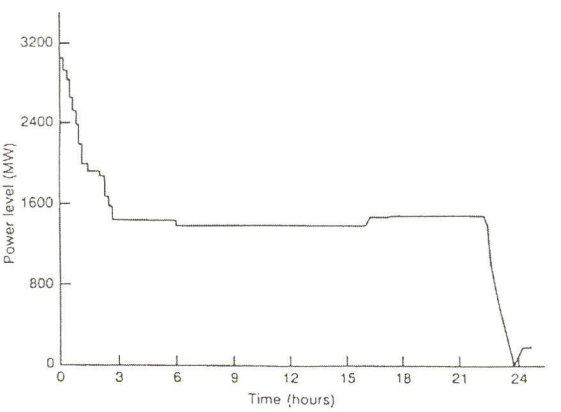
1986年4月25日に保守のため4号炉を停止することになっており，その前に外部電源が喪失した場合に，タービン発電機の回転慣性エネルギーにより主循環ポンプと非常用炉心冷却系の一部を構成する給水ポンプに電源を供給する能力を調べる試験を行う予定となっていた。

第 II-1 表　事象の推移[6]

時刻	事象
1986年4月25日 (時刻は運転日誌)	
01:06	・出力降下開始；反応度操作余裕(ORM)は手動制御棒31本分
03:45	・原子炉の黒鉛パイルの冷却に使用している窒素－ヘリウム混合ガスを窒素ガスに変更開始。
03:47	・原子炉熱出力1600MW
04:13～ 12:36	・原子炉熱出力1500MW一定で制御系特性とタービン発電機No.7と8の振動特性を順次測定。
07:10	・反応度操作余裕は手動制御棒13.2本分。
13:05	・タービン発電機No.7を送電網から切り離し
14:00	・ECCSを多重の循環ループ（MFCC）から切り離し。
14:00	・キエフ給電指令所からの要求により実験計画の実行延期。
15:20	・ORMは手動制御棒16.8本分。
18:50	・実験で要求されていない補助電力は運転中のT6変圧器に切換。
23:10	・負荷降下継続；ORMは手動制御棒26本分。
1986年4月26日 (時刻は診断記録プログラムDREGプリントアウト)	
00:05 *	・原子炉熱出力720MW。安定な出力降下継続。
00:28 *	・原子炉出力500MW付近で局所出力制御系から低出力レンジ自動出力制御系1及び2に切り換え；移行中に予定されていない出力低下が起こり、熱出力が30MWに(中性子出力ゼロ)；4～5分後、出力上昇開始。
00:34:03	・気水分離器水位異常
00:43:37	[気水分離器水位が非常用防護系の設定点である－600mmを超える(設定点は－1100mmのままであった)。(時刻はDREGによる印字)]
00:52:27	
01:00:04	
01:09:45	
01:18:52	
00:36:24	・気水分離器圧力低保護信号(原子炉トリップ)設定点を55から50kg/cmに変更。
00:39:32～	・DREG不作動。
00:43:35	・運転員が2台のタービン発電機停止による保護信号をブロック。
00:41*～ 01:16*	・タービン発電機No.8を、空運転に伴う振動を低下させるため送電線から切り離し。
00:52:35～ 00:59:54	・DREG不作動。
01:03	・原子炉熱出力200MWまで上昇し、安定化。
01:03*	・7台目の主循環ポンプ（MCP-12）投入。
01:07*	・8台目の主循環ポンプ（MCP-22）投入。[給水流量を突然右側90t/h、左側180t/hに減少。全循環流量56000～58000t/hに。その結果、循環ポンプ入口温度は280.8℃(左側)283.2℃(右側)に達する。]
01:12:10～ 01:18:49	・DREG不作動。
01:18:52	・[設計想定事故(DBA)信号(DREGプログラムによる)。]
01:19:39	・「制御用制御棒－1完全引抜」信号**発信。
01:19:44～ 01:19:57	・「制御用制御棒－1完全引抜」信号**発信。
01:22:30	・磁気テープにパラメータが記録される。(事故後スモレンスク発電所で、原子炉のパラメータを計算するPRIZMAプログラムによる計算を実施；ORMは手動制御棒8本分と判明。)[チェルノブイリ発電所で測定できないパラメータは計算されていない；事故後、ORMはPRIZMAプログラムで標準的な軸方向出力分布を用いて計算されたが、手動制御棒1.9本分を示した；現実の軸方向出力分布を用いた計算では6～8本を示した。]
01:23:04	・「オシログラフ投入」信号発信、第8タービン非常用止め弁閉。4台の主循環ポンプのコーストダウン開始(No.13, 23(8RA部分)No.14, 24(8RB部分))。
01:23:10	・最大想定事故ボタン押す。
01:23:30	・「制御用制御棒－1完全引抜」信号**消える(3分33秒間)。
01:23:40 (テレタイプでは39秒)	・AZ-5(緊急停止)ボタン押す。緊急保護系制御棒及び手動制御棒が炉心内に挿入開始。
01:23:43	・出力逸走ペリオドによる緊急保護信号発信；ペリオド20秒未満；原子炉出力による保護信号発信発信－出力530MWt超過。
01:23:46	・最初の1対のコーストダウン中の主循環ポンプ遮断
01:23:46.5	・次の1対のコーストダウン中の主循環ポンプ遮断
01:23:47	・コーストダウンしていない主循環ポンプ（MCP-11, 12, 21, 22）の吐出流量40%急減及びコーストダウンしている主循環ポンプ(MCP-13, 14, 23, 24)の流量の信頼できない指示；気水分離器圧力急上昇；水位急上昇；両方の主領域レンジ自動制御系(自動出力制御系No.1, 2)の「検出器故障」信号。
01:23:48	・コーストダウンしていない主循環ポンプの流量がほぼ初期値に回復；左側のコーストダウンした主循環ポンプ流量は初期より15%低い値に回復；右側のコーストダウンした主循環ポンプ流量は、MCP-24では初期より10%低い値に回復；MCP-23では信頼できない値に；気水分離器圧力さらに上昇（左側75.2kg/cm^2, 右側88.2kg/cm^2）、水位も上昇；蒸気を復水器1, 2に放出する急速作動設備作動。
01:23:49	・緊急保護信号「原子炉スペース圧力高(圧力管破断)」；「48V電源喪失」信号(緊急保護系のサーボ駆動機構の電源喪失)；「自動出力制御系1, 2の駆動装置故障」信号。
01:24 *	・何回かの強いショック。制御・保護棒は停止し、下端に達せず。クラッチ電源断(原子炉制御主任技師のメモより)

*　：時刻は運転日誌による。
**：“One overcompensation upwards” signal（表中の訳はロシア語より）
[ ]：アバギャン報告[10]の記載

第 Ⅱ-1 図に，アバギャン報告に示された解析による出力の変化を示す。4 月25日01：06より出力降下を開始したが，14：00のキエフ給電指令所からの要請により，その後長時間にわたり出力約50%の運転が続いたため，炉心にゼノン(Xe)が蓄積し，出力の維持，制御が困難な状態に陥った。23：10から試験を実施するため出力降下を開始した。翌 4 月26日00：28には出力は一たん30MWまで低下したが，01：03には200MWまで回復し，安定した。そこで，試験を強行することとして，計画に従い01：03，01：07に運転中の各ループ 3 台(計 6 台)の主循環ポンプに加え，各ループ 1 台のポンプを起動した。この結果，炉心の流量が増加してボイド率が減少し，出力を維持するために自動制御棒が上限まで上昇するとともに，運転員は手動制御棒を引き抜いて出力を制御しなければならない状態に陥った。このため，後述する反応度操作余裕(ORM：Operational Reactivity Margin)が大きく低下した。01：23：04(1時23分 4 秒を意味する。以下同じ)に運転員は実験対象としていた第 8 タービンの止め弁を閉止して実験を開始した。これによりタービン発電機がコーストダウン(回転数の減少)を開始し，炉心流量が減少し始めた結果，炉心でのボイド率が上昇し，出力が増加し始めた。そして，その30秒後の01：23：40に，運転員は緊急保護系(EPS：Emergency Protection System)-5ボタン(ロシア語で“AZ-5”ボタンと呼ばれる)を押した。この点に関し，ウィーン会議では，「運転員は出力の上昇を見てAZ-5ボタンを押したが，制御棒の挿入速度が遅く，出力上昇を抑えられなかった」と報告されている。ただし，安全委報告[4]には，「ソ連の発表によれば，運転員の証言から，AZ-5ボタンを押した他の動機として，①試験開始後40秒近くが経過し，データから見て試験が成功だったと判断したため，あるいは②自動制御棒が次々に挿入される事態になったのを見て原子炉の緊急停止が必要と判断したため，の 2 つの可能性を挙げているが，あいまいな点もあるとしている」と記載されている。すなわち，運転員がどのような状況でなぜAZ-5ボタンを押したのかという点について，ウィーン会議ですでに議論があったことが示されている。シュタインベルク報告にはこれに関する明確な記載はなく，未だに明確にはなっていない。



第 Ⅱ-1 図　暴走に至る前の出力の解析結果[10]

(3)　運転員の規則違反に対する評価

第 Ⅱ-2 表に，ウィーン報告で指摘された 6 つの運転員の規則違反と，それに対するINSAG-7での主な見解をまとめる。これらの見解を要約すると「6 つの規則違反と呼ばれたものの多くは，実際には規則違反でなかったか，あるいは規則違反であったとしてもその後の事故の進展に大きな影響はなかった」というものである。

ただし，INSAG-7で明確に規則違反としているものにORMが規定値(15本分)を下回ったことがある(第 Ⅱ-2 表中のNo.1)。ORMとは，「スクラム信号が発生した時に作動する全制御棒の挿入によって得られる反応度投入速度が，最も効果的な位置にある制御棒の何本分の反応度投入速度に相当するかを示すもの」[3]であり，ウィーン報告では，「ほとんどの制御棒が上限まで引き抜かれており，ORMは6〜7本程度であったため，AZ-5ボタンを押してから負の反応度が投入されるまでに 6 秒かかる状態であった」と報告されている。ウィーン報告での事象推移では，「01：22：30：ORMが規定値を下回るがこれを無視」と記載されていたが，シュタインベルク報告ではこの記載は削除され，「モニタリングシステムのパラメータが磁気テープに残されており，事故後にこれを解析した結果，ORMは 8 本分であったことが判明した」との記載が追加されている。すなわち，ORMが規定値を下回っていたことは，事故後に判明したということである。ウィーン報告以後，ORMは実は安全上極めて重要なパラメータであり，これが減少すると正のボイド反応度係数が大きくなるとともに，後述するように，ポジティブスクラムの効果も大きくなるということが明確になってきた。INSAG-7では，運転員がORMの値を容易に知ることができるようになっていなかった(計算機のプリントアウトを取りに行く必要があった)ことと，これが原子炉の保護系に組み込まれていなかったことが問題であったと指摘している。さらに，「当時の運転員は，その安全上の重要性を理解せず，ORMは空間的な出力の不均衡を制御するパラメータに過ぎないと認識していた」ことが基本的な問題であったと指摘している。ただし，これは単に運転員の問題だけではないことは自明である。これは，後述するように，プラントのレベル，国のレベルの問題であった。

2 基のタービン発電機の停止信号に基づく緊急保護信号のバイパス(第 Ⅱ-2 表中のNo.4)については，INSAG-1では，これを重要視し，「これが生きていれば事故を回避できた可能性があった」としたものであるが，INSAG-7では，新しい情報に基づき，「運転手順および試験手順に従ったものであり，通常運転時でも，低出力ではそうすることが要求されていた」としている。さらに，ポジティブ・

第 Ⅱ-2表 「運転員の6つの規則違反」に対するINSAG-7での見解

No.	ウィーン報告[1,4]		INSAG-7の主な見解[9]
	違反された操作	動 機	
1	「反応度操作余裕(ORM)」が許される値よりも著しく少なかった	ゼノンオーバーライド対策のため	規則違反である 運転員は最後のORMの値を知らなかった可能性が高い(容易に知ることができるようになっていなかった) ORMの安全上の重要性が認識されていなかった
2	出力が試験計画で指定されているものより低かった	局部自動制御を切った際の運転員のエラー	700MW以下の出力運転は禁じられていなかった 禁ずる規則があるべきであった 左記の運転員のエラーはなかった
3	想定で定められている流量を超えて待機中の循環ポンプが投入された	試験プログラムを実施するため	8台の循環ポンプの運転は，試験手順を含め，いかなる文書でも禁じられてはいなかった 結果として，流量の制限値は超えた
4	2基のタービン発電機の停止信号に基づいた炉の保護信号をバイパスした	試験を繰り返す必要があるかもしれないと考えたため	運転手順および試験手順に従ったもの。通常，低出力ではそうすることが要求されていた INSAG-1では，「これをしなければ事故を回避できた」としたが，ポジティブ・スクラムを考えると，これは正しくないようだ
5	気水分離内の水位レベルと蒸気圧に関する保護信号をバイパスした	炉が不安定な状態でも試験を遂行しようとした	圧力については，運転員は設定点を変更したが，その判断は運転員に委ねられていた(違反ではない)。バイパスされてはいなかった 水位については，設定点をリセットしなかったのは手順違反である。ただし，低い方の設定点は生きており，バイパスされてはいなかった[a] 事故の進展に影響はなかった
6	最大想定事故保護するシステム(炉のECCSシステム)が切り離された	試験を遂行中にECCSの誤作動を避けるため	技師長の許可のもとに許されており，試験のため許可は取られていた 11時間に低出力運転も試験の一部とすれば違反とはいえないが，長時間にわたりバイパスする必要はなく，セーフティ・カルチャーの欠如を示すものである 事故の進展に影響はなかった

[a] 水位設定点は−600mmと−1,100mmがある。後者は常にAZ-5(スクラム)の設定点となっている。前者については，出力降下時にAZ-1(異常のレベルが低い場合)用の設定点として用い，その後AZ-5用にリセットする手順となっている[6]。

スクラムを考えると，この信号をバイパスしなかったと仮定すると，タービンをトリップした時点で原子炉の暴走に至った可能性があったことを示唆している。なお，この信号をバイパスした時刻は，ウィーン報告に基づいたINSAG-1では01：22：30となっているが，シュタインベルク報告では，00：43：35に変更されている(第 Ⅱ-2表参照)。

気水分離器内の水位レベルおよび圧力に関する保護信号のバイパス(表中のNo.5)に関しては，ウィーン報告では，01：19：00にこれらの保護信号をバイパスしたとされているのに対し，シュタインベルク報告では，圧力の設定点については，「00：36：24に設定点を変更した(下げた)が，保護信号をバイパスしてはいなかった」と記載されている。水位設定点については，シュタインベルク報告，アバギャン報告には，「本来−600mmにリセットすべきであったが，−1,100mmのままであった」と記載されており，実際には保護信号はバイパスされてはいなかったことが示されている。

出力が試験計画で指定されているものより低かったこと(第 Ⅱ-2表中のNo.2)についても，シュタインベルグ報告等は，「700MW以下の出力運転はいかなる手順でも禁じられてはいなかった」としている。ただし，INSAG-7では，試験手順では出力700MWで試験することとなっていたにもかかわらず，それを維持できず，200MWで強行したことについて，「運転員がその場で試験条件を変更するようなことはセーフティ・カルチャーの欠如を示すものである」として厳しく批判している。

待機中の主循環ポンプ2台が投入されたこと(第 Ⅱ-2表中のNo.3)については，いかなる規則でも禁止されておらず，違反行為ではなかったが，結果として流量が規定値を超えたとしている。

非常用炉心冷却系(ECCS：Emergency Core Cooling System)を切り離したこと(第 Ⅱ-2表中のNo.6)については，技師長の許可の下に許されており，実際に試験のために許可が取られていたとしている。しかしながら，試験の実施が延期された後，11時間にもわたってECCSを切り離す必要性はなく，違反でなかったとしても，適切ではなかったとしている。ただし，これは事故の進展に何の影響もなかったとしている。

以上，規則違反であったか否かという問題自体は技術的

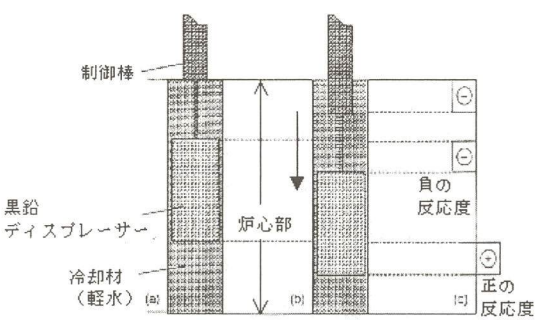
観点からは重要ではなく，安全上重要な物理量に対する設計上の対応が十分ではなく運転員に過度の負担を負わす結果となっていたこと，さらに，そうした状況下で規則や手順が十分整備されていなかったこと，十分な安全解析がなされておらず，炉の特性が把握されていなかったこと等が問題であったことがわかる。INSAG-7が強調するように，運転員の操作は規則違反ではなかったとしても適切なものではなかった。ただし，その根本原因は，運転員，プラント，設計者および国のすべてのレベルに存在していたと理解すべきであろう。

（4） ポジティブ・スクラム

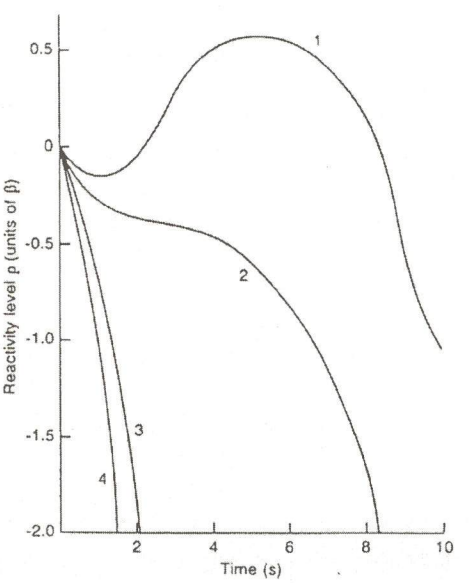
事故当時のRBMK型炉では，**第Ⅱ-2図**に示すように，制御棒下端に黒鉛ディスプレーサが取り付けられており，これが炉心最下端部まで達していないため，制御棒が挿入され始めると，まず，黒鉛ディスプレーサと炉心最下部との間にある水が排除されるため，正の反応度が印加される。この現象をポジティブ・スクラムと呼んでいる。黒鉛ディスプレーサは，制御棒を引き抜いた状態での中性子経済を良くすることを目的としたものであるが，黒鉛の量を節約するため，上下端部がカットされていたものと理解されている。

ポジティブ・スクラムについては，安全委報告[4]には，「米国DOE報告[14]では，RBMK型炉制御系の構造から，制御棒挿入時約3秒間正の反応度が投入され，これが今回の出力上昇に大きく寄与しているとしているが，我が国の解析結果では，この正の反応度投入は定量的にはほとんど無視できることが判明した」と記載されており，ウィーン会議当時から議論されていたことが伺われる。旧ソ連からの公式報告書としては，1987年に旧ソ連がIAEAに報告した論文"One Year Later"[15]にポジティブ・スクラムに関する明確な記述がある。ただし，これはRBMK型炉の安全性向上策としての制御棒の改善に関するものであり，これが事故原因を構成する重要な因子であるとの認識は示されてはいない。すでに述べたように，その後，1990年から1991年にかけて未公表文書「決定」やシュタインベルク報告が公表されたが，この間，我が国を含め西側諸国でも，ポジティブ・スクラムに関する技術的検討は進められており，幾つかの論文が発表されてきた[16]。その内容は，おおむね，ポジティブ・スクラムにより投入される反応度は，事故時の軸方向中性子束分布に大きく依存し，それが下部に歪んでいる場合，大きな正の反応度が投入される可能性があるというものであった。**第Ⅱ-3図**に，アバギャン報告に示されたポジティブ・スクラムによる添加反応度を示す。添加される正の反応度はORMの値に大きく依存し，事故時(図中の1の曲線)には0.5秒で約0.6$の正の反応度が添加されたと推定されている。

パリ会議で報告された2件の論文やシュタインベルク報告，アバギャン報告(ボルショフ論文)は基本的にはポジティブ・スクラム主因説に立っている。シュタインベルク報告では，「事故の原因は，制御棒の黒鉛ディスプレーサによってもたらされた初期の反応度添加による出力上昇にあり，それが，大きな正の反応度フィードバックにより増大した」としている。ただし，アバギャン報告では，「クルチャトフ研究所を含む3つの研究機関で実施された3次元の核熱水力解析では，いずれも十分には出力の暴走が再現できなかった」と記載されている。パリ会議でのアダモフ論文では，ポジティブ・スクラムだけでは出力の暴走を再現することはできず，キャビテーションを起こした主循環ポンプからの蒸気の侵入等の反応度を添加する他の事象についても考えるべきであることを示唆している。同論文で



第Ⅱ-2図 ポジティブ・スクラムの発生機構[10]



1：チェルノブイル事故時(ORM＝手動制御棒7本分（設計基準事故条件))
2：運転手順で指定されたORM(手動制御棒15本分)
3：改良原子炉制御・保護系，ORM＝手動制御棒30本分
4：改良原子炉制御・保護系，急速作動緊急保護系

第Ⅱ-3図 ポジティブ・スクラムで添加された正の反応度[10]

は，事故を再現するためには1.3＄程度の正の反応度の添加が必要としている。

INSAG-7では，これらの見解をレビューした結果として，もし何らかの決定的な要因があったと仮定したとしても，それを特定することは重要ではないとして，ポジティブ・スクラムが主要因であったか否かの判断を避けている。しかし，ポジティブ・スクラムについては，1975年にレニングラード1号炉で，1982年にはチェルノブイリ1号炉で前兆というべき事例が起きており，さらに，1983年にはイグナリーナ原子力発電所でその重要性が認識されたにもかかわらず，何の対策が取られなかったことが極めて重要であると指摘している(事例の詳細は，「Ⅲ. RBMK型原子炉の現状」参照)。これについてシュタインベルク報告では，設計者はすでに1976年の段階でその重要性を認識しており，その具体的改善策も検討されていたが，実際には何の対策も取られなかったと記されている。事故後わずか1ヶ月半でRBMK型炉の具体的な安全向上策が公表された事実はそれを裏付けるものであると論じている。ジャトロフ書簡にも同様な記載がある。これが意図的な情報の操作であったか否かは本稿の範囲を超えるものである。ただし，ウィーン会議の時点で旧ソ連政府はポジティブ・スクラムの重要性を認識しており，それを意図的に隠蔽したとの見解[17]があることも記しておきたい。

(5) まとめと教訓

INSAG-7では，チェルノブイリ原子力発電所のみならず，国全体としてセーフティ・カルチャーが欠如していたことがこの事故の根本原因であるとしている。それには種々の意味が含まれる。国のレベルでは，政治，経済的側面もあろう。有効な規制体制が確立されていなかったこともその一つである。設計者，プラントのレベルでは，十分な安全解析がなされておらず，十分な規則や手順が整備されていなかったこと，炉の安全上の特性が理解されていなかったこと等が挙げられる。設計者のレベルでは理解されていたとしても，少なくとも各プラントおよびその運転員には伝えられなかった。当然，十分な教育や訓練はなされなかった。運転員のレベルでは，運転員は立ち止まって考える(stop and think)ことを怠り，その場で実験条件を変更してしまったことが挙げられよう。

ポジティブ・スクラムに関しては，事故以前にその重要性が認識されていたにもかかわらず何の対策も取られず，ウィーン報告では，それに言及することなく，事故の主要因を運転員の規則違反と断定した。

上記のようにまとめると，チェルノブイリ事故の根本原因を構成するこれらの要素は，驚くほどJCO事故のものと共通性があることに気付く。例えば，手順が数回にわたり承認なしに変更されたこと，手順がその場で変更され臨界事故に至ったこと，作業員が臨界という現象を含め，施設の安全上の特徴を理解せず，規則・手順の意味も理解していなかったこと，十分な教育，訓練がなされていなかったこと，十分な規制監視がなされていなかったこと，生産性向上への圧力が背景にあったこと等[18]が挙げられよう。これらの要因のほとんどが，チェルノブイリ事故ですでに指摘されたものであった。すなわち，我々はチェルノブイリ事故から教訓を学ぶことに失敗したといっても過言ではない。皮肉にも，チェルノブイリ事故から学ぶべき最も重要な教訓の一つに，「教訓に学ぶべき(前兆となる事例が起きていたにもかかわらず対策が取られなかった)」ということがあった。

チェルノブイリ事故から学ぶべき教訓は多い。これらを再度明確にし，安全性の向上にフィードバックさせなければならない。

2. 暴走後の事故進展の様子

(1) はじめに

前節に示したように，事故は暴走出力の発生によって始まったが，その後，事故はどのように進展していったのであろうか。また，その結果，原子炉はどのようになってしまったのだろうか。

事故の進展について最初に記載されたものは前述のウィーン報告[1]である。他に，事故の状況について記載したものとしては，IAEAがまとめたINSAG-1[2]，米国NRCがまとめたNUREG-1250[14]，我が国の原子力安全委員会のまとめた安全委報告[3,4]があるが，これらは，主にウィーン報告に基づいており，内容的にはほぼ同等のものとなっている。ここで，原子炉内の状況については，外部からの観察と放射能の測定結果から推定したものである。なお，事故直後に事故シナリオを検討した論文としては，「チェルノブイル原子力発電所の事故シナリオに関する考察」[19]がある。

事故終息後，シェルタ建設に際し，γ線，熱流束等の測定器を搭載したブイの据付，炉心領域並びに原子炉下部の領域までのボーリング調査等様々な手段で原子炉内の状況が調査され，次第に解明されてきた(調査の詳細は，「Ⅳ. 事故現場の今」参照)。調査の様子は，1986～1990年の事故復旧作業の様子を記載した「チェルノブイリ苦難の5年」[20]に示され，前述のパリ会議でも一部紹介された[21]。さらに，1994年3月14～18日にキエフで行われた「チェルノブイリ4号機石棺安全シンポジウム」において，調査方法とその結果，シェルタ内の状況が報告されている[22,23]。これらの知見をもとに，当時，米国マサチューセッツ工科大学のA.R. Sichは，事故後の事故影響緩和対策を再評価し，事故のシナリオを再検討している[24~26]。また，E.M. Pazukhinは，LFCMのサンプル採取を実施し，その分析結果から，独自に事故のシナリオを推定している[27]。また，事故全般について考察を加えたものに「原子炉の暴走」[28]がある。

事故時の放射性物質放出量については，ウィーン報告で，空からのγ線計測結果をもとに算出した値が報告され

ている。その後，見直し検討がなされ，OECD/NEAが1996年「チェルノブイリから10年—放射線・健康影響」[29]をまとめている。

なお，これらの検討とは別に，E.E. Purvis Ⅲは，最初の暴走による炉心損傷部から放出された蒸気により炉心全体が持ち上げられ，炉心から冷却材が流出したことにより大きな反応度が印加され爆発を起こしたとする説を唱えている[26]。

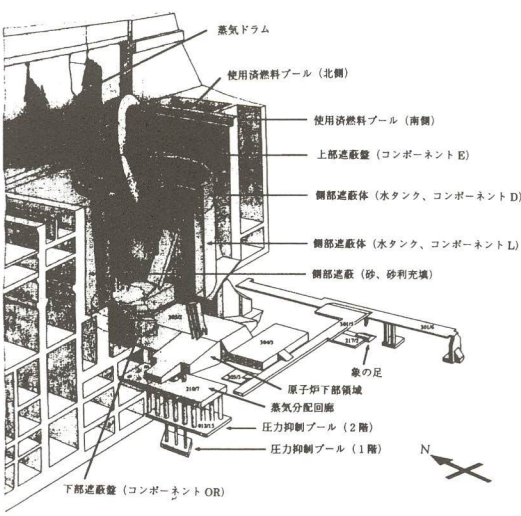
（2） 事故後の燃料の様子

前述のように，原子炉内のボーリング調査等を通じて，炉内の燃料の状況が明らかになった。炉内の様子を**第Ⅱ-4図**[25]に，LFCMの流れの様子を**第Ⅱ-5図**[30]に示す。全体の様子は「Ⅳ. 事故現場の今」に示されるが，燃料の様子をまとめると，以下のようになる。

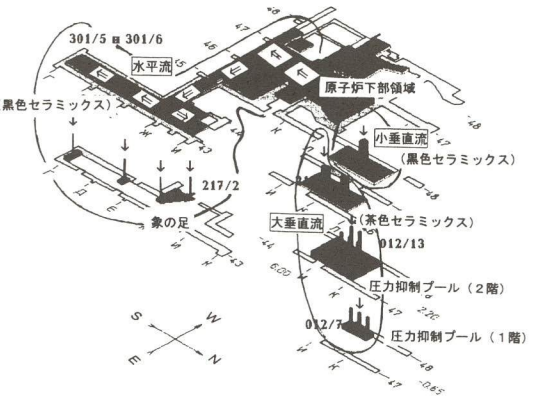
(1) 炉心部には少量の燃料や黒鉛の破片があるが，全体としては空っぽである。ヘリコプタから投下された物質はほとんどない[24]。原子炉より上部の中央ホールには爆発で飛び散った燃料や黒鉛のかけら，破壊された構造物，さらに，ヘリコプタから投下した物質等が山をなしている[24]。

(2) 下部遮蔽盤はその約1/4が失われ，さらに，支持構造物をつぶして下方へ移動している[25]。

(3) 燃料は融けてコンクリートや他の構造材と反応して溶岩状になり，原子炉下部から垂直方向並びに水平方向へ流出し固化している（溶岩状燃料含有物質：LFCM：Lava-like Fuel-Containing Materialsと呼ばれる）。流れは大きく分けて，「大垂直流」,「水平流」,「小垂直流」の3つの流れからなる。これらは，茶色または黒色のセラミックス状で，一部はサプレッションプールまで落下，水と接触して軽石状になっている[25,27]。なお，このほかに，燃料は，壊れた破片，細かな燃料粒子（ダストまたはホットパーティクル），汚染された水の形でも存在することが，確認されている。



第Ⅱ-4図 炉内の様子[25]



第Ⅱ-5図 溶岩状燃料含有物質（LFCM）の流れ[30]

さらに，燃料の出す崩壊熱量の測定[22]等から炉内にある燃料の量の推定も行われた。例えば，文献23, 25）では135±30 t，文献27）では70～150 tと推定している。事故前に約200 tあった燃料のうち，かなりの部分はLFCMとなって，原子炉下部に存在すると推定される。

（3） 事故の進展の様子

これらの知見をもとにすると，事故はどのように進んでいったと考えられるのだろうか。事故当初認識されていた暴走後の事故の経緯をまとめると，おおよそ以下のようになる[1~3, 24, 29]。

原子炉の暴走後，2回の爆発が起こり，建屋の上半分が完全に破壊した。建屋の外に高温の燃料や黒鉛が放出され，機械室の屋根などで火災を発生させた。消防士の活躍で，5時ごろにはこの建屋火災は鎮火した。その後，原子炉で黒鉛の火災が始まった。この黒鉛火災を鎮火するため，また，継続する放射能放出を抑えるため，4月27日よりヘリコプタから大量の砂等を投下した。

放射能の放出は，4月26日の事故開始当時の大量放出後，一時減少したが，5月2日頃から再び増加し始めた。溶融燃料と水との接触を避けるため，5月3日に圧力抑制プールの水抜き作業を実施した。また，5月5日には，溶融燃料の冷却のため，原子炉下部空間への窒素注入が開始された。放射能の放出は事故から9日目の5月5日頃に急激に減少し事故は一応終息した。

この間，原子炉内ではどのような事象が進展していったのであろうか。ここでは，以下の段階に分けて，検討する。

(1) 原子炉の暴走に続く原子炉の破壊

(2) その後の事故の継続と終息過程

(a) **原子炉の破壊について**

原子炉の暴走後，2回の爆発が起こり，建屋の上半分が完全に破壊した。

1回目の爆発は，ウィーン報告，安全委報告[3]では，「水蒸気の急激な発生による加圧破損」と推定している。

2回目の爆発については，安全委報告[3]では「なお不明な点が多いが，Zr-H_2O反応等の化学反応により生じた可燃性ガスの空気との混合による熱爆発の可能性が強い」としている。また，INSAG-1では，水素が寄与したかどうかははっきりしていないとしていたが，「チェルノブイリから10年—放射線・健康影響」では，「2度目の爆発では，水素が重要な役割を果たしたと考えられる」としている。

さらに，安全委報告[4]において，我が国の解析を踏まえ，以下のような，原子炉施設および建屋の破壊の可能性について考察がされている。

a) 反応度事故に起因する燃料の微細化による伝熱面積の増加，および，高温に達した被覆管と水との急激な発熱反応により，冷却材が急激に過熱，蒸発し，圧力管内圧の急上昇，圧力管の破損が生じた可能性

b) 放出された蒸気による上部遮蔽盤と炉心の間の空間の圧力上昇により，上部遮蔽盤が持ち上げられ，それにより，圧力管破断した可能性

c) 被覆管と水の反応等によって発生した水素の爆発による建屋の破壊の可能性

d) ジルコニウム-水反応の発熱による黒鉛リングの酸化，この反応熱と燃料の崩壊熱とによる炉心黒鉛ブロックの温度上昇，酸化発生の可能性

その後，この原子炉の破壊過程に関しては，特に新しい知見は出ていない。反応度事故に起因する燃料の微細化⇒冷却材の過熱，蒸発⇒圧力管内の圧力上昇⇒圧力管破損⇒上部遮蔽盤と炉心上部との間の空間の圧力上昇⇒上部遮蔽盤の持ち上がり，圧力管の破断⇒水素爆発等による建屋破壊といった過程を通ったと考えてよいであろう。

また，安全委報告では「燃焼した黒鉛の量は約250 t」，INSAG-1は，「少なくとも黒鉛の10%(250 t)が燃焼した」としている。黒鉛については，その後，調査は進んでおらず，特に新しい知見は得られていない。

(b) 事故の継続と終息過程について

ウィーン報告に示されるように，原子炉の破壊後も放射性物質の放出が継続した。放射性物質の放出量は，事故当初，空からのγ線計測結果をもとに，以下のように推定された[2]。

希ガス：炉心に存在した量の100%

その他：炉心に存在した量の約3〜4％：約2×10^{18} Bq (5×10^{7} Ci)

うち，Cs, I, Teは炉心に存在した量の約10〜20%

他の核種は約3〜6％

その後，放射性物質放出量についてはさらに見直しが行われた。「チェルノブイリから10年—放射線・健康影響」では，

第Ⅱ-3表 チェルノブイリ事故による放射性核種の推定放出量[29]

1986年4月26日の原子炉インベントリー			事故による全放出量	
核種	半減期	放射能 (PBq)	インベントリー全体に対する割合	放射能 (PBq)
^{33}Xe	5.3d	6,500	100	6,500
^{131}I	8.0d	3,200	50〜60	〜1,760
^{134}Cs	2.0yr	180	20〜40	〜54
^{137}Cs	30.0yr	280	20〜40	〜85
^{132}Te	78.0h	2,700	25〜60	〜1,150
^{89}Sr	52.0d	2,300	4〜6	〜115
^{90}Sr	28.0yr	200	4〜6	〜10
^{140}Ba	12.8d	4,800	4〜6	〜240
^{95}Zr	1.4h	5,600	3.5	196
^{99}Mo	67.0h	4,800	>3.5	>168
^{103}Ru	39.6d	4,800	>3.5	>168
^{106}Ru	1.0yr	2,100	>3.5	>73
^{141}Ce	33.0d	5,600	3.5	196
^{144}Ce	285.0d	3,300	3.5	〜116
^{239}Np	2.4d	27,000	3.5	〜95
^{238}Pu	86.0yr	1	3.5	0.035
^{239}Pu	24,400.0yr	0.85	3.5	0.03
^{240}Pu	6,580.0yr	1.2	3.5	0.042
^{241}Pu	13.2yr	170	3.5	〜6
^{241}Cm	163.0d	26	3.5	〜0.9

第Ⅱ-3表に示す値を推定しているが，以下に示すように，当初，推定値より大きな放出量を推定しているのが特徴である。

^{131}Iについては，事故時の炉心存在量のうち50〜60%

^{134}Cs, ^{137}Csについては20〜40%

^{132}Teについては25〜60%

環境中に放出された燃料物質量としては当初，全体の3±1.5%と推定され[1,29]，その後，ソ連国内外の研究データをもとに3.5±0.5%と推定されている[20,29,31]。なお，別途放射性物質の放出量を再評価したA.R. Sichも燃料放出量は3.5±0.5%を支持している[26]。これらの結果から，希ガス，揮発性核種は多く放出されたが，大部分の燃料は，炉内に止まっていると考えられる。

放射性物質放出の時間経過については，**第Ⅱ-6図**[29]に示すような，いわゆるバスタブ曲線となっており，以下に示す4段階に分けられる[1]。

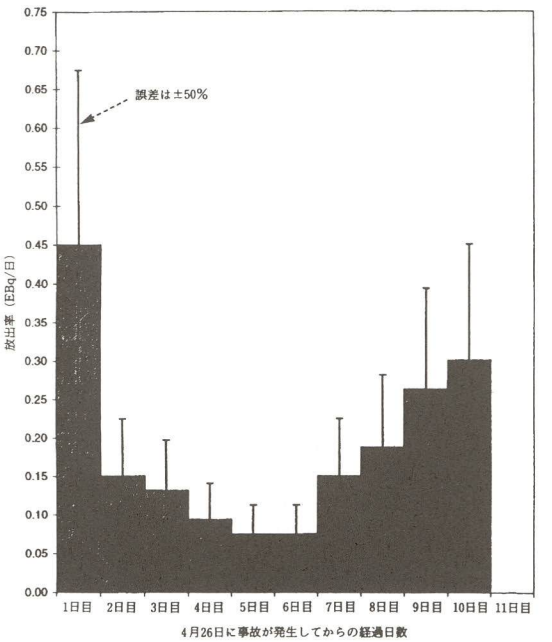
第1段階： 事故発生時の激しい初期の放出(核種の組成は，燃料内の核種組成にほぼ一致，ただし，I, Te, Cs等の揮発性核種および希ガスは多い)

第2段階： 4月26日から5月2日までの放出量が減少した期間(核種組成は燃料内の組成に近い)

第3段階： 放出量の急激な増加(初期においては，揮発性成分，特にIの放出が多い。その後は，再び燃料内の組成に近づく)

第4段階： 放出の急激な低下

これに対しては当初，以下のような事故影響緩和対策と結



第 Ⅱ-6図　1日あたりの大気中への放射性物質の放出量[29]

び付けた説明が加えられていた[1,3,14]。

第2段階の減少は，物質投下により，黒鉛の燃焼が停止したことおよび投下された泥や砂のフィルタ効果による。なお，この期間の放出放射性核種の成分は燃料の成分に近い。これは，微細に破壊された燃料が熱い空気の流れおよび黒鉛の燃焼生成物に伴って放出されたためである。

第3段階の増加は，物質投下が中止され，再び燃料が崩壊熱により温度上昇したためである。

第4段階の急激な減少は，窒素注入の効果および核分裂生成物が投下物質と反応し難溶性の化合物の形成による。

それに対し，A.R. Sichは，「事故時にとられた事故影響緩和対策は，ウィーン会議でソ連が報告したほど有効ではなかった」と主張している[24]。事故時の事故影響緩和策として，

(1) 炉心への様々な物質投下
(2) 液体窒素の炉心投入
(3) サプレションプールからの水抜き
(4) 原子炉建屋基礎下への熱交換器設置

が実施されたが，これに対しては，以下のような見解を述べている。

(a) 投下した物質の大部分は炉心に到達しておらず，炉心からの放射性物質放出抑制にはほとんど役立っていない。
(b) また，液体窒素の炉心注入については，実際に作動したのは5月6日以降であり，その後の調査によれば，溶融燃料は，窒素注入までに炉心下部へ流れ落ちており，そこで固化したと考えられている。そのため，その段階で窒素を注入しても役に立っていない。
(c) サプレッションプールの水抜きについては，サプレッションプールに落下した溶融燃料は軽石状になっており，水と接触したと考えられる。なお，特に水蒸気爆発を起こした形跡は見られていない。
(d) 熱交換器については，溶融燃料が早い時期に固化していることがわかったため計画が中止されている。

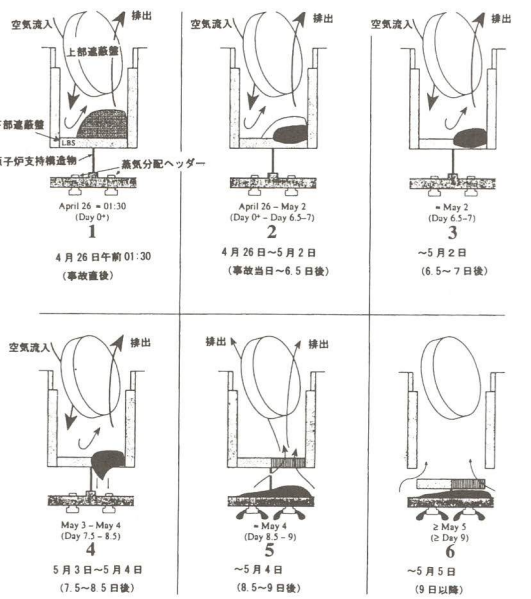
また，事故当初に測定された放射能放出量について再検討を加えた[26]。これは，事故後，IAEAに提出された測定値に加え，事故当時，原子炉上空でソ連軍のヘリコプタでフィルタを用いて採取され，クルチャトフ研究所で分析された値(PROBAデータバンクシステムと呼ばれる)を合わせて考察したものである。さらに，放出量を，揮発成分と不揮発成分に分け，その時間変化を分析し，これらを踏まえ，事故の進展過程を以下のように推定している。**第 Ⅱ-7図**に，シナリオを図示する。

a) ステージ1

事故初期の爆発的な破壊による放射性物質の段階である。残った炉心部は下部遮蔽盤の上へ落下した。

b) ステージ2

事故発生から6.5〜7日頃まで，(4月26日〜5月2日)の期間である。燃料は崩壊熱等により溶融を開始した。溶融燃料は黒鉛との密度差により分離し，黒鉛の下に層を形成した。黒鉛は燃焼し，溶融燃料は下部遮蔽盤と反応・侵食した。さらに，構造物の金属は溶融し，底部に金属の多い層ができた。



第 Ⅱ-7図　A.R. Sichによる事故シナリオ[26]

c) ステージ3

6.5〜7日後(5月2日)で，この頃，上部の黒鉛層が燃え尽きた。これは，以下の状況から推定したものである。

①下部遮蔽盤の上に残っているわずかの黒鉛ブロック等を除き，原子炉領域には黒鉛が残っていない。

②溶融燃料の分析の結果，黒鉛や黒鉛を含む粒子が存在しない。

③放射性物質放出量の推移をみると，この時期までは，揮発性成分と不揮発性成分が同じような挙動を示していたのが，この時期，不揮発性成分の割合が減少し，揮発性成分の割合が増加している。これを，黒鉛が燃え尽きたため燃料の温度が上昇し，揮発性成分が放出されやすくなり，さらに，黒鉛の層によるフィルタ効果がなくなったことにより揮発性成分が増え，一方，不揮発性成分は黒鉛燃焼による上昇気流がなくなったため減少したと解釈した。

d) ステージ4

7.5〜8.5日後(5月3〜4日)で，溶融燃料は下部遮蔽盤を貫通し，炉心下部領域に落下した。これは，調査の結果，下部遮蔽盤の南東部1/4が喪失していること，この頃に放出放射性物質量が急増していること等から推定したものである。なお，放出量の急増は，溶融燃料が落下し広がったこと，サプレッションプール内で水と反応したことが原因と推定している。

e) ステージ5

8.5〜9日後(5月4日)で，この時期，溶融燃料は活性を失い，固化したと推定している。この時期以降，放射性物質の放出量は急減している。

f) ステージ6

9日以降であり，溶融燃料は固化し安定した。

また，E.M. Pazukhinの実施したLFCMのサンプル分析の結果を以下に示す[27]。

1) LFCMは，その組成から，燃料と，下部遮蔽盤，原子炉周りに充填してあった砂，構造材コンクリートが溶融混合したとすると説明がつく。

2) これらの溶融のための熱量は，燃料の持つ崩壊熱数日分で十分供給される。

3) LFCM内にチェルノビライトと呼ばれる結晶((Zr, U)SiO_4で表され，ジルコン$ZrSiO_4$のZrの一部がUに置換された構造，最大0.5mm)が発見されているが，その結晶成長には1,660〜1,670℃で4〜5日を要する。

4) Euが半分くらいに減損しているが，Euは1,600〜1,700℃で揮発する。一方，それ以上高温にならなければ揮発しない不揮発性物質はほとんどLFCM中に残っており，上記，チェルノビライト生成温度と考え合わせると，この温度付近でLFCMが生成されたと推定される。

さらに，その結果を踏まえ，LFCM生成過程を考察しているが，その基本的な過程はA.R. Sichの推定と矛盾したものではない。

(4) まとめ

以上，原子炉の暴走以降の事故の進展過程についての検討を紹介した。事故後の炉内の調査により，ある程度，事故の進展過程が推測されるようになってきた。これまでの知見を以下に示す。

(1) 事故後，約10日間にわたって放射性物質放出が継続したが，放出された燃料物質は3〜4%であり，大半の燃料は炉内に存在する。

(2) 原子炉の破壊後，燃料は崩壊熱等により過熱溶融し，炉内から下部遮蔽盤を溶融貫通し，原子炉下部で他の物質と溶融混合して，そこから垂直方向，並びに水平方向に流出し，固化してLFCMを形成した。

なお，事故終息のため実施されたヘリコプタからの物質投下等の対策は，あまり効果がなかったとの見解も出されている。ただし，炉内の燃料についてはすべてが確認されたわけではない。また，黒鉛の挙動については，あまり調査が進んでいない。いまだ解明すべき点が残されている。

チェルノブイリ炉はRBMKと呼ばれる旧ソ連独特の型式ではあるが，事故により燃料が溶融した後は，型式を問わず共通するものがあると考えられる。さらに，研究を進めていく価値があるのではないだろうか。

——参考文献——

1) USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy, "The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and Its Consequences", Information Compiled for the IAEA Experts' Meeting, 25〜29 August 1986, Vienna, Austria.

2) International Nuclear Safety Advisory Group, *Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident*, Safety Series No. 75-INSAG-1, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1986).

3) 原子力安全委員会，ソ連原子力発電所事故調査特別委員会，ソ連原子力発電所事故調査報告書—第1次，昭和61年9月9日，(1986).

4) 原子力安全委員会，ソ連原子力発電所事故調査特別委員会，ソ連原子力発電所事故調査報告書，昭和62年5月28日，(1987).

5) 例えば，1990年7月17日付朝日新聞朝刊.

6) N.A. Shteinberg, *et al.*, "Causes and Circumstances of the Accident at Unit 4 of the Chernobyl Nuclear Power Plant on 26 April 1986", Report by a Commission to the USSR State Committee for the Supervision of Safety in Industry and Nuclear Power, (1991), (Shown as Annex I of INSAG-7 in Ref. 9)).

7) L.A. Bolshov, *et al.*, "The Chernobyl Accident Current Vision of Its Causes and Development", *Proc. Int. Conf. Nuclear Accidents and the Future of Energy*, Lessons Learned from Chernobyl, April 15-17, 1991, Paris, France, (1991).

8) E.E. Adamov, Yu.M. Cherkashov, "The RBMK Reactor Improvement and Its Safety Increase", *Proc. Int. Conf. Nuclear Accidents and the Future of Energy*, Lessons Learned from Chernobyl, April 15-17, 1991, Paris, France, (1991).

9) International Nuclear Safety Advisory Group, *INSAG-7, The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1*, Safety Series No.75-INSAG-7, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1992).
10) A.A. Abagan, E.O. Adamov, L.A. Bolshov, *et al.*, "Causes and Circumstances of the Accident at Unit 4 of the Chernobyl Nuclear Power Plant and Measures to Improve the Safety of Plants with RBMK Reactors", Report by a Working Group of USSR Experts, 1991 (Shown as Annex II of INSAG-7 in Ref. 9)).
11) E.B. Palkovsky, *et al.*, "Seismic Phenomena in the Area of Chernobyl Nuclear Power Plant", *Geophys. J.*, **17**〔3〕, (1998).
12) メドベージェフ, 松岡信夫訳, 内部告発, ㈱技術と人間, (1990).
13) Excerpts from Letters of Anmatolij Dyatlov to the IAEA, *Nucleonics Week*, May 16, 1991.
14) U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Report on the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Station*, NUREG-1250, (1987).
15) *The Chernobyl Accident: One Year Later*, IAEA-48163, (1987).
16) 例えば, S.W, Chen, *et al.*, "Chernobyl Accident: Multidimensional Simulations to Identify the Role of Design and Operational Features of the RBMK-1000", Int. Topical Conf. on PSA and Risk Management, Zurich, Switzerland, Aug. 30 to Sept. 4, 1987.
17) NHK スペシャル, チェルノブイリ, 隠された事故報告, 1994年1月16日放映.
18) 原子力安全委員会, ウラン加工工場臨界事故調査委員会, ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告, 平成11年12月24日, (1999).
19) 石川迪夫, 他, "チェルノブィル原子力発電所の事故シナリオに関する考察—原子炉出力の異常な上昇から黒鉛火災に至るまで," 原子力工業, **32**〔12〕, (1986).
20) チェルノブィリ苦難の5年：1986～90年間のチェルノブィリ原発事故の清算作業についての資料集, モスクワ AT 出版, (1992).
21) S.T. Belyayev, *et al.*, "Technical Management on the Chernobyl Site. Status and Future of the "Sarcophagus", *Proc. Int. Conf. Nuclear Accidents and the Future of Energy*, Lessons Learned from Chernobyl, April 15-17, 1991, Paris, France, (1991).
22) N.N. Bazyr, *et al.*, "Assessment of SNF Amount inside the Damaged ChNPP Unit 4 Based on the Heat Measurements", Sarcophagus Safety '94, March 13～18, 1994, Kiev, Ukraine.
23) V.K. Tolstonov, "Encasement 'Ukrytie' State and its Safety Problems", Sarcophagus Safety '94, March 13-18, 1994, Kiev, Ukraine.
24) A.R. Sich, "Chernobyl Accident Management Actions", *Nucl. Safety*, **35**〔1〕, (1994).
25) A.A. Borovoi, A.R. Sich, "The Chornobyl Accident Revisited, Part Ⅱ: The State of the Nuclear Fuel Located within the Chornobyl Sarcophagus", *Nucl. Safety*, **36**〔1〕, (1995).
26) A.R. Sich, "The Chornobyl Accident Revisited, Part Ⅲ: Chornobyl Source Term Release Dynamics and Reconstruction of Events during the Active Phase", *Nucl. Safety*, **36**〔2〕, (1995).
27) E.M. Pazkhin, "Fuel-Containing Lavas of the Chernobyl NPP Fourth Block: Topography, Physicochemical Properties, and Formation Scenario", *Radiochemistry*, **36**〔2〕, (1994).
28) 石川迪夫, 原子炉の暴走 SL-1からチェルノブィリまで, 日刊工業新聞, 1996年4月30日.
29) OECD/NEA, *Chernobyl Ten Years on Radiological and Health Impact*, Paris, (1995).
30) TACIS "The Shelter's Current Safety Analysis and Situation Development Forecasts (Updated Version)", (1998).

Ⅲ. RBMK型原子炉の現状

富士電機㈱顧問 明比道夫,
元㈶海外電力調査会 藤井晴雄

1. はじめに

RBMKは「大出力チャンネル型原子炉」と名付けられた炉型の略語である。我々の炉型分類では「黒鉛減速沸騰軽水冷却圧力管型」ということになる。1974年から1990年にかけて, レニングラード1号炉に始まりスモレンスク3号炉に終わる5発電所, 17基が建設された(ロシアに11基, ウクライナに4基, リトアニアに2基)。なお, ロシアで1基建設中(クルスク5号炉)である。

ロシアでは現在, RBMKが原子力発電量の約55%を占め, VVER(加圧水型炉)の45%を大きく上回っている。リトアニアではイグナリナ1号炉の停止が決まり, ウクライナのチェルノブイリ発電所で最後まで運転を続けていた3号炉も, 2000年12月に永久停止した。しかしながらチェルノブイリ事故という大きな十字架を背負ったRBMKではあるが, この炉は1960～1970年代の原子力開発の黄金期を代表する炉型の一つであることには間違いない。

本章では, RBMK型原子炉の生い立ち, チェルノブイリ事故の前兆と提案された対策案, 事故後の改良と現状, RBMKをめぐる最近の動きなどに重点をおいて解説する。

RBMKの開発創生期の状況は, 第4回原子力平和利用国際会議(ジュネーブ会議, 1971年)でM.A.ペトロシャンツ, A.P.アレクサンドロフ, N.A.ドレジャリらが発表した「レニングラード原子力発電所とチャンネル型沸騰水原子炉の展望」や最近, ウクライナでまとめられたユニット"シェルター"(1998年)などにあるが, その行間を埋めるためにはパーソナル・コミュニケーションによる情報がその性格ゆえに欠かせない。RBMKの設計上の問題点や, 事故後の改良点は国際原子力機関(IAEA)の種々の技術的なレポートに詳しい。最近のRBMKを取り巻く国際的な状況については, リトアニアで技術交流を進めてきた武田充司氏の「リトアニア共和国イグナリナ発電所1号機の閉鎖をめぐって」(原子力誌, Vol.42, No.12, 2000)などがある。

2．RBMKという原子炉の開発

（1） 大出力チャンネル型炉開発に対する当時の背景

1960年代初めの旧ソ連では，電気出力500～1,000 MW規模の原子力発電所が建設されれば，原子力発電は国のエネルギー戦略に大きく寄与することが明らかになってきた。

1950年代後半では，動力源として加圧水型原子炉を備えた原子力潜水艦や原子力砕氷船（レーニン号）が就航していた。この加圧水型炉の技術経験をベースに，電気出力210 MWのVVER型ノボボロネジ原子力発電所1号炉が着工し，1964年12月運転を開始した。これにより旧ソ連ではVVERをベースに大規模な開発プログラムが採択され，旧ソ連邦内のみならずワルシャワ条約機構の国々での建設が計画された。

しかしここで原子炉圧力容器の製造能力に問題が生じた。当時のソ連国内ではこの要求を満たす圧力容器の製造能力は，せいぜい440 MW出力のVVER用が限度であり，工場を新設し圧力容器を完成させるまでには時間が必要であった[1)]。

大型原子力発電所の建設を急いだ旧ソ連は，原子炉圧力容器なしで原子炉を構成できるチャンネル型の大出力原子力発電所の建設を検討し，1964年末から電気出力1,000 MWの大出力チャンネル型ウラン黒鉛炉（RBMK-1000）に対する討議を重ね，1966年9月の閣僚会議決議により8基のRBMK-1000原子力発電所の建設計画が承認されたわけである[2)]。

（2） RBMKの創出を可能にした技術的背景，経緯

RBMK-1000という大型のチャンネル型炉が急に開発され，登場したわけではない。それまでの技術的な蓄積，経験の上に開発された。

(a) チャンネル型・黒鉛減速・水冷却原子炉の原点

I.V.クルチャトフやN.A.ドレジャリらによって1948年6月に完成された核兵器用プルトニウム（Pu）生産炉は，減速材の黒鉛ブロックに縦にアルミニウム（Al）管を通し，その中にAlで被覆したUの短棒を挿入して，隙間に非循環式冷却水を流すという方式の炉である。このAl管は「燃料チャンネル」と呼ばれた[3)]。このPu生産炉が，RBMKの縦形チャンネル・黒鉛減速・水冷却という設計概念の起点になった。

もともと原子力を電力生産に利用することに関心のあったクルチャトフは，その可能性を調べるために小規模原子力発電所の建設を提案し，チャンネル型Pu生産炉と同じ型の黒鉛減速軽水冷却炉が1951年にオブニンスクで建設された[3)]。この発電所は第一原子力発電所と名付けられ，1954年6月に完成した。旧ソ連は1955年開催の第1回原子力平和利用国際会議（ジュネーブ会議）で，この世界最初の原子力発電所の完成を発表し[4)]，西側に大きな驚きを与えた。この炉はチャンネル型と呼ばれているがRBMKとは異なり，冷却材の圧力バウンダリーとなるチャンネル管（圧力管）はなく，燃料集合体自身が冷却材の通路[a)]を備えている[5)]。

オブニンスク炉の設計思想はベロヤルスク1号炉（100 MW）および2号炉（200 MW）に引き継がれた（1964～67年に運転を開始）。両炉には冷却材蒸気の核過熱という斬新な冷却方式が採用され，これによって高い熱効率が追及された。2号炉は単一冷却回路（直接サイクル）を採用し，炉心で発生した過熱蒸気は直接タービンに送られた。この単一冷却回路方式はRBMKの設計に受け継がれた。

(b) RBMK-1000の基となったシベリア原子力発電所

Pu生産炉の設計を続けていたドレジャリは，Pu生産と発電との2重目的炉の構想を持っていた。これを受け，旧秘密都市トムスク-7に，電気出力100 MW規模のPu生産炉が建設され，1958年に運転を開始した。これはシベリア原子力発電所の名前でも知られている[3,6)]。この2重目的生産炉は，チャンネル型黒鉛減速軽水冷却炉である。Pu生産に対しては，中性子の無駄な吸収を避けて燃料サイクル効率を上げるためにチャンネル管と燃料被覆管にAl合金を採用し，発電に対しては，蒸気発生器-過熱器を備えた2重冷却回路を採用して，炉内で約200℃に加熱した冷却材で2次系を蒸発，過熱し，過熱蒸気をタービンに送るというものである。冷却材の系統圧力が50気圧に加圧され，Alのチャンネル管がその圧力バウンダリーを構成し，しかも大型で100 MW規模の発電系統を備えたとあれば，原子力発電所としての一通りの設備を設けていたと考えられる。このことから，シベリア原子力発電所は圧力管型チャンネル構造の原点といえ，この大型炉の設計，建設，運転の経験が，その後のRBMK-1000の開発の直接の基盤になったといえる。

(c) ジルコニウム・ニオブ合金の開発

RBMKの実現に大きく貢献した技術要素は，旧ソ連におけるジルコニウム（Zr）合金の開発成果である。炉心の中性子経済を良好にして燃料サイクル効率を高め，冷却材温度を上げて良質の蒸気をタービンに送ってプラント熱効率を向上させるためには，RBMKのチャンネル管には機械強度と耐食性の高いZr合金の採用が必須であった。

1950年代初めに開始されたZr合金の開発は全ソ航空材料研究所（VIAM）が当たった（今日では主に無機材料研究所で行われている）[1)]。VVER第1号炉となるノボボロネジ原子力発電所1号炉は，RBMK-1000の開発計画の討議が始まった正にその時期に運転を開始した（1964年12月）。このことは，その時期にVVERに対して燃料被覆管としてZr-1% Nb合金を，構造材としてZr-2.5% Nb合金を使用する設計仕様が確立したことを意味する。このZr-

[a)] 燃料要素は同心円状の2重管からなる管状構造で，間隙は燃料物質で満たされ，冷却材は内管の中を流れる。この燃料要素4本が黒鉛ブッシュの中に配列され，中心部に冷却材の流入管が通っている。

2.5% Nb合金がRBMKのチャンネル管(圧力管)に最適な材料として選択されたのは当然のことであった。

(3) RBMK実現に向けての過程

(a) 開発者と設計者

1965年，RBMKの開発作業が開始された。クルチャトフ研究所が概念設計と研究開発に当たり，動力工学開発設計研究所(NIKIET)が基本設計を担当した。発電所全体の建設は当時のレニングラードに本部があったエネルギー技術設計研究所(VNIPIET)が当たった。設計の開発と同時に建設の準備が始まり，レニングラードの西70 kmのソスノーヴィ・ボールがサイトとして選ばれた[1](**第 Ⅲ-1 図**)。

この時点では，前述のチャンネル型(ただし圧力管型ではない)黒鉛炉ベロヤルスク 1 号炉(100 MW)が完成したばかりで，2 号炉(200 MW)は建設中であった。出力を100 MWから1,000 MWに飛躍させ，しかもチャンネル構造を新規の圧力管構造に変えるためには，膨大な研究開発を必要としたに違いない。

(b) 大型化構想

RBMKの出力を西側のBWRやPWRのように500 MW，800 MWの段階を経ずに，最初から1,000 MWという大出力を設定した背景には，前述のように，2 重目的炉シベリア原子力発電所の豊富な設計，建設，運転経験の蓄積があるからである[1]。このため，当時の開発・設計指導者は自信をもって出力を1,000 MWに決めることができたものと思われる。その自信のほどは1971年のジュネーブ会議で早々と電気出力2,000 MWのRBMK-2000を提案している[6]ことからもうかがい知れる。

第 Ⅲ-1 図 レニングラード原子力発電所

1980年刊行のドレジャリの著作[7]では，RBMKはRBMK-1000からRBMK-1500, RBMK-2000, RBMKP-2400と展開する構想があったことがわかる。

以上のような大型化構想のうち，RBMK-1500はリトアニアのイグナリナ原子力発電所 1, 2 号炉として実現したが，RBMK-2000は日の目を見なかった(大型化はチャンネル数を増やすのではなく，チャンネル出力を上げることによって実現)。

3. RBMKの特徴

RBMKの特徴としては，チャンネル型であることにより，

- 大型原子炉圧力容器が不要，同一構成要素を増やすことにより大型化が容易
- 運転中燃料交換による稼働率と燃料サイクルの改善(低濃縮ウランの使用と燃焼度の向上)
- 冷却回路分割による安全性の向上
- 個別燃料チャンネルの燃料破損早期検出による放出ガスの低減

などが挙げられる。しかし，多くの負の特徴も合わせ持っていた。チェルノブイリ事故の前兆ともいえる事象も事故以前に現れており，開発・設計関係者ではその弱点は認識されていた。

なお，RBMKと我が国の軽水炉の設計上の違いを**第 Ⅲ-1 表**に示す。これを安全性の観点から要約するならば，万一の事故のときに放射能の外部放出を防ぐ障壁となるべき格納容器が，我が国の軽水炉にはあるがRBMKにはないこと，我が国の軽水炉は原子炉の暴走を防ぐ自己制御性(負の反応度係数)を有しているが，RBMKは逆に暴走を助長する正の反応度係数を有していた，という 2 点が重要なポイントとなる。

(1) チェルノブイリ事故の前兆と当時提案されていた対策[2]

RBMK-1000の第 1 号炉は1973年12月にソスノーヴィ・ボールで起動したが，1975年11月30日に最初の重大な事故が発生した。原子炉完全停止後の再起動出力上昇時に，20%出力で炉内に著しい局所的な出力のシフトが起り，その結果，燃料チャンネルの 1 本が破損した。この事故で初めて炉内の局所的な冷却材喪失によるボイド反応度係数の影響が示された。原子炉出力制御設備の不適切さがこの事故を助長した。運転員に非難が集まったが，当時の調査委員会は，原因は人為ミスではなく，一義的に原子炉構造の特異性にあると結論づけている。

RBMKの設計欠陥は，各発電所の運転経過に伴って繰り返し明らかになった。1981年と1983年のチェルノブイリ 3, 4 号炉およびイグナリナ 1 号炉の起動試験時に，安定性限界値，DNB，そして燃料許容温度に対する余裕が少ないというようなRBMK炉心の欠陥が示された。

第 Ⅲ-1 表　RBMK-1000とわが国の軽水炉との違い

(1)　炉心圧力容器

RBMK　：外形14.5m，高さ9.8mの原子炉容器の中に，直径約14m，高さ約8mの黒鉛ブロック(炉心)がある。この中に厚さ4mmの圧力管が1,661本あり，この圧力管の中に燃料集合体が納められ，炉心圧力容器はない。

BWR/PWR：炉心圧力容器の大きさは，BWRの場合，厚さ約160mm，高さ約23m，直径約6.5m，PWRの場合，厚さ約140mm，高さ約13m，直径約4.5mの大きな炉心圧力容器の中に炉心全体が納められている。

(2)　炉心

RBMK　：燃料集合体本数は1,659本で，1986年4月当時のU濃縮度は初装荷燃料が1.8%，取替燃料が2.0%であった。取換燃料の濃縮度が低かったため，低出力時に正の反応度となって事故に結びついたので，事故後に取替燃料のU濃縮度を2.4%として正の反応度を押さえた。

BWR/PWR：BWRの燃料集合体は765本，PWRの燃料集合体は193本で，初装荷燃料のU濃縮度は2～3%，取換燃料のU濃縮度は約3～4%である。

(3)　冷却材および減速材

RBMK　：冷却材に軽水を，減速材に黒鉛を使用している。

BWR/PWR：冷却材と減速材に軽水を使用している。

(4)　非常用炉心冷却装置(ECCS)

RBMK　：燃料冷却のために圧力管の1本1本に水を注入する必要があるが，圧力管に直接水を補給する方式ではない。

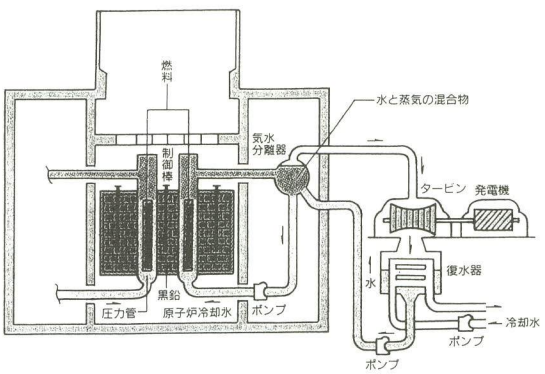
BWR/PWR：圧力容器内に直接水を補給する方式である。

(5)　原子炉格納容器

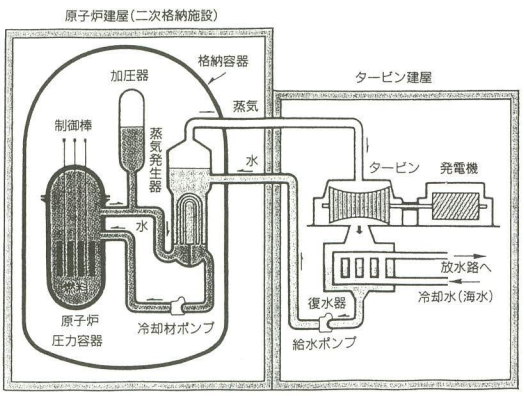
RBMK　：局所的に事故の拡大を防止する設備が設けられているが，炉心全体を包む密封型で頑丈な原子炉格納容器はない。

BWR/PWR：炉心圧力容器全体を包む密封型で頑丈な原子炉格納容器がある。

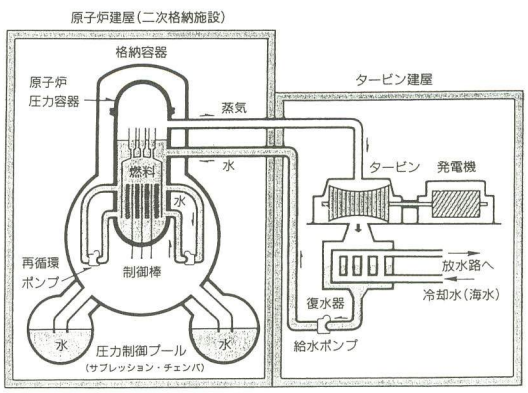
第 Ⅲ-2 図にRBMK型炉の概念図を，**第 Ⅲ-3 図**にBWRおよび**第 Ⅲ-4 図**にPWRの概念図を示す。



第 Ⅲ-2 図　RBMK型炉の概念図



第 Ⅲ-4 図　PWRの概念図



第 Ⅲ-3 図　BWRの概念図

さらに起動試験時の極低出力で行った4号炉での炉物理試験で，制御安全棒(CPS)を挿入すると，5秒間だけ反応度が負ではなく正になるという異常な挙動を引き起こすことが判明した。

このような不適切な効果を除くために，当時ロシアではいくつかの対策案が検討されたが(手動制御棒の上端リミットスイッチまでの引抜き制限，CPSの完全引抜き数の制限，CPSから下部水コラムの取外し等)，それらはいずれも実施されなかった。RBMK第1号炉の起動時以降の主な各機関からの提案を**第 Ⅲ-2 表**にまとめる。

以上のように，RBMKの不具合な特性，その影響の危険な結果および安全性改善策は，チェルノブイリ事故のはるか以前に知られていた。このことは事故後わずか6週間

第 Ⅲ-2表　RBMKの1号炉の起動時以降，RBMKの設計上の不具合点を補う提案

1975年―中型機械省は，炉心の下部に必ず中性子吸収体を恒久的に挿入しなければならないとするA.P.アレクサンドロフの提案を受け入れた。特に緊急保護系AZ-5に短尺吸収棒を組み込むことが提案された。しかし，これは事故後になってから初めてチェルノブイリ3号炉に実施された。
1976年―レニングラード1号炉の事故の後，中型機械省はボイド反応度係数の低減と制御安全棒(CPS)の挿入速度に関する勧告を作成した。しかしこれもまた事故後に実施された。
1980年―NIKIETはRBMKの物理的欠陥のすべてをまとめる作業を終えた。
1983年―クルチャトフ研究所は手動制御棒と緊急制御棒の構造を変えるように提案した。ディスプレーサの下の水コラムを除くことを目的としたものである。またRBMKの過渡事象と緊急時操作の徹底的な解析を実施することを提案した。
1984年―NIKIETはディスプレーサの効果を補償するさまざまな対策を提案した。しかし，この対策はチェルノブイリ事故に間に合わなかった。

で，安全性改善のための緊急対策案が提案されたことからも類推される。しかしこの対策案は，事故原因を人為ミスとみなした事故直後の公式見解とは，まったくかけ離れたものであった。

(2) チャンネル流量調節弁の閉塞事故

RBMKでは1986年のチェルノブイリ4号炉事故を除いても，非常に重大な事故が2回起きている。それはチャンネル流量調節弁の閉塞によるチャンネル圧力管の破断事故である。RBMK-1000のチャンネル出力は，燃料装荷時は約3MWであるが，取出し時には約1.2MWに低下する[1]。このため運転サイクル中に2回，各チャンネルの冷却材流量を調節することとしている[8]。これはRBMKの設計上の大きな特徴の一つである。

(a) 1982年9月9日，チェルノブイリ1号炉

チェルノブイリ1号炉で環境への放射性物質の放出を伴う事故が発生した。起因は調節弁の開操作と閉操作を取り違えた運転員のミスであった。チャンネル流量は減少したが，自動緊急保護系は作動しなかった。時間的に遅れて原子炉を停止することになり，圧力管62-44が破断して中の燃料要素が破損した。この事故の主因は，原子炉がこのような人為ミスに対して保護されていないことと，緊急保護系の速度が不十分であることである[2]。

(b) 1992年3月24日，レニングラード3号炉

同様の事故がレニングラード3号炉で発生し，圧力管52-16が燃料集合体上端部で破断した。この時の原因は，設計不良による調節弁の閉塞であった。この事故を受けて，すべてのRBMKの流量調節弁が交換された[2,10]。

4. RBMKの改良と現状

(1) チェルノブイリ事故後の安全性向上策

チェルノブイリ事故以前の安全対策は，旧ソ連邦独自の想定事故に対して原子炉の緊急停止，非常用炉心冷却，過圧防止，格納容器に代わる局所閉じ込め機能などの安全設備を設置していた。ここでは，事故後の安全性向上策が取られた経緯，対策点を示す。

(a) 事故に結びついた設計上の特徴

チェルノブイリ4号炉が事故に結び付いた設計上の特徴は，おおよそ次の通りにまとめることができる。

- 冷却水中の蒸気量が増えると出力の上がり方が多くなり(正のボイド反応度フィードバック効果)，特に低出力時にこの傾向が顕著になる。
- 制棒棒の挿入速度(0.4m/s)が遅いため制御棒が高さ約8mの炉心に全挿入されるまで約20sかかり，緊急停止に時間がかかる。また制御棒の構造上，挿入直後に正の反応度が発生する。
- 炉心の安全性を確保するため，定められた数の制御棒を炉心に挿入しておく必要がある。
- 原子炉格納容器がない。

(b) 国際原子力機関(IAEA)による技術的検討

IAEAでは1991年より7～8年かけ，各国の多くの専門家の参画により，旧ソ連型炉の安全性向上のために各種の技術的問題が検討された。特に，改善すべき課題を摘出し，分類化した。このIAEAにおける技術的検討では，資金的にも，人材的にも我が国は大きな寄与をした。IAEAでの安全性向上のための方策，改善の基本的な考え方は，すでに運転しているプラントの安全性向上として，特に事故発生防止に留意した改善，および万一事故が発生しても拡大を抑制する設備の強化である。

具体的内容として，以下のような項目を検討した。

事故発生防止

a) 計測，制御系の近代化
b) 圧力バウンダリー健全性の検査技術および漏洩検知技術
c) 運転員の訓練と手順書の整備
d) 点検および保守技術の改善

事故の拡大抑制

a) 冷却材喪失事故時の対策強化
b) 火災防護設備の強化

(c) 実施されてきた安全性向上策

このようなIAEAを始めとした各種の検討を基に，RBMKを保有するロシア，ウクライナ，リトアニアでは，先進7ヵ国(G7)や国際機関の支援を受け，プライオリティの高い短期的に改善が必要とされる課題から順次改善・改良が進められた。特に炉心特性の安定化，原子炉停止系の性能向上等，運転員の操作性向上につながる改良が進められた。現在では長期的に改善が必要な課題が取り組ま

第 Ⅲ-3 表　チェルノブイリ事故以後の主な安全性向上内容―設計上の改善や運転員の資質向上のための組織強化

(1) 設計上の改善

炉心特性の安定化：　チェルノブイリ事故以前の取換燃料の濃縮度は2.0%であったが，チェルノブイリ事故以降は2.4%燃料に順次取り換えてボイド反応度係数を低減させた。また制御棒の本数を増加させた。

制御棒引抜きの上限値の変更：　緊急停止効果を高めるため，すべての制御棒が炉心の上端から1.2mの位置より上側に引き抜けないようにした。

反応度操作余裕の増加：　原子炉の緊急停止を確実に行うことができるよう，反応度操作余裕を制御棒で30本相当から80本相当に増加させた。

原子炉緊急停止設備の改善：　原子炉緊急用制御棒の全挿入を急速に行うよう制御棒を改善し正のスクラム効果を防止した。

反応度操作余裕計算システムの設置：　反応度操作余裕が規定値より低下する場合は，自動的に緊急停止するように変更した。

緊急炉心冷却系の改善：　特に第1世代炉(レニングラード1，2号炉，クールスク1，2号炉，チェルノブイリ1，2号炉)を中心として，炉心冷却能力を強化した。

原子炉格納容器機能の向上：　原子炉室加圧防護性を向上した。特に第1世代炉への局所閉じ込め機能向上させた。

電源の強化：　ディーゼル発電機を増設し，バッテリー機能を強化した。

圧力バウンダリーの健全性確保：　圧力管の交換および検査方法の確立を行った。

(2) 運転員の資質向上のための組織の強化

・スモレンスク原子力発電所(RBMK-1000，3基)には，付属の運転訓練センターが1987年に完成して，RBMK発電所運転員の訓練を開始し，年間約600人を訓練している。

・1992年までに延べ約3,000人が訓練を受け，スモレンスクおよびレニングラード発電所の運転員は全員訓練を済ませ，ウクライナのチェルノブイリ，リトアニアのイグナリナ，ロシアのクルスク発電所は約50%が訓練を受けた。これで，RBMK発電所の総運転員の約60%が訓練を終了したことになる。

・再訓練は1〜3年のうちに受けることになっている。

れている。実施されてきた主な設計上の改善や運転員の資質向上のための組織強化について**第 Ⅲ-3 表**にまとめる。

(2) RBMKの現状

各種の安全性向上策により，RBMKの安全性はチェルノブイリ事故以前に比べ大きく高まったということはできる。しかしながら出力制御の難しい大型炉心を持ち，格納容器のない構造には変わりはない。ここではRBMKに特有な2〜3の設計上の課題について，最近の様子を示す。

(a) 正のボイド反応度係数

RBMKの設計上の致命傷は4βという大きな正のボイド反応度係数であった。現在，RBMKには2.6%濃縮UO_2に酸化エルビウム(Er_2O_3)0.4%を混合した燃料が使われている。エルビウム(Er)は0.47 eVに共鳴吸収のピークがあり，炉心から冷却材が喪失すると熱中性子のスペクトルが共鳴吸収域に移る。このEr燃料の使用により，冷却材喪失時の正の反応度添加はゼロ近くになったという[1]。

(b) 燃料

RBMKの設計燃焼度は21,000 MWd/tであったが，これはチェルノブイリ事故の前の話で，ホウ素吸収材の追加などいろいろな安全対策が取られたので，現在の燃焼度は大きく減少して14,000 MWd/t程度である。原子炉は毎日平均1.5チャンネルの燃料を交換し，燃料の滞在時間は3〜5年である[1]。RBMKの使用済燃料は現在，各発電所に保管されている。

(c) 圧力管

Zr-2.5%Nb合金の圧力管は，中性子照射クリープにより直径が年々少しずつ増加する。一方，圧力管が通っている黒鉛ブロックの孔の直径は，中性子照射を受けて圧力管とは反対に収縮する。圧力管と黒鉛ブロックとの間隙は1.5mmで，チャンネル出力の高い領域では正味16年の運転でこの間隙が埋まってしまうと考えられている。現実にこの密着が起こった場合には，圧力管と黒鉛ブロック自身の健全性が損なわれ，圧力管に湾曲等の変形が起き，また規定の方法では圧力管の引抜きができなくなると懸念されていた。現在，ロシアではRBMKの寿命期間中に1回の圧力管交換を考えており，レニングラード1，2号炉ではすでに実施している[1,9]。なお，最近のイグナリナでの各種の検討の結果では，閉塞には至らない可能性もあるという結果も出されている[11]。

5. RBMKをめぐる最近の動き

RBMKはレニングラード1号炉以来，17基が建設されたが，チェルノブイリは4基とも永久停止し，イグナリナ1号炉も2005年初頭には停止されることになっている。しかしながらロシアのクルスク5号炉は建設を続行している。RBMKに対して欧州を中心とする世論は非常に厳しい状況には変化はないが，旧ソ連解体後のロシア，ウクライナ，リトアニアのそれぞれの政治的，社会的な状況の変化，西側諸国との係わりにより，政治的問題とも絡んでRBMK問題が存在するようになっている。

(1) ウクライナ

2000年12月15日のチェルノブイリ3号炉の閉鎖によりRBMK4基が完全に閉鎖された。RBMKに残された問題は，これらプラントのデコミッショニングと従業員の再雇用，そして破壊された4号炉(シェルタ)の環境に対する安全化作業である。デコミッショニングに係わる技術的諸問

題は米国を中心とした欧米諸国の協力を得て検討が進められている。数千人に上る再雇用問題は社会的にも問題が大きく，デコミッショニング要員，チェルノブイリ３号炉の閉鎖と引き替えに建設が再開するフメリニツキ２号炉，ロブノ４号炉(両炉ともVVER-1000)用の要員なども視野に入れ，検討が進められている。さらにチェルノブイリ従業員の街であったスラブチッチの社会的，経済的将来についても同時に検討が進められている。しかしながら，ウクライナでは旧ソ連解体，独立後，経済活動が軌道に乗っておらず，国力が停滞している。このため，シェルタ問題も含めこれらすべてに先進７ヵ国(G7)やEU諸国の協力の下に進めざるをえない状況にある。

(2) リトアニア

イグナリナ1，2号炉(**第Ⅲ-5図**)はG7の原子力安全基金(NSA)やEU資金により，メインコンピュータの入替え(１号炉は済み，２号炉は準備中)から，発電所内の消火器設置など細部にわたる機器類の交換/設置，さらに発電所要員の人的過誤の低減措置まで，ハード的な物からソフト的な物まで幅広く各種の安全性向上策が進められてきた。現在では，自国経費を主体とした長期的安全対策を実施している。この過程では１号炉に対する西側手法による安全解析が実施され，西側の専門家もそれによりRBMKの把握に大きく寄与し，リトアニアと日米欧の専門家が協力して技術的課題を議論する基礎が造られた。

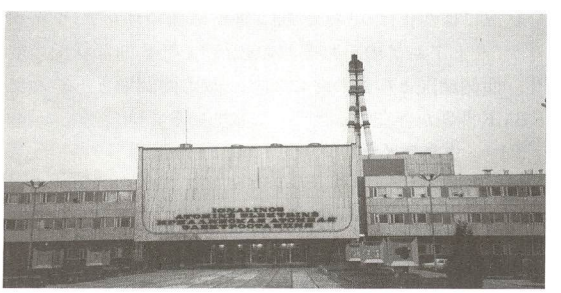
１号炉は2000年５月，リトアニア議会により2005年初頭に閉鎖する法案を正式に承認し，２号炉についても閉鎖時期に関する議論を2004年以降に開始することを併せて決定した。しかし，EUは２号炉の閉鎖時期の明記を強く要求してきており，かねてより2009年の閉鎖を要求している。

1999年のイグナリナ発電所の発電電力量は98億6,000万kWhで，リトアニアの総発電電力量に占める原子力の割合は73.1%と非常に重要なエネルギー源であり，その閉鎖問題は国の根幹を揺るがす重要問題である。このため，特に２号炉の閉鎖問題は長期的なエネルギー戦略の下で代替電源の検討を充分に行った上で，議論する必要がある。

(3) ロシア

第13回IAEA予算外プログラム管理委員会が2001年５月末にウィーンで開催され，RBMK安全性向上に関する溶接部欠陥対策について外国の経験をロシアに伝え，2002年５月の最終会合までに，報告書をまとめRBMKの安全運転に資することになっている。

ロシアのRBMKに対して，西側諸国ではイグナリナと同様の西側手法による安全解析の実施を要求してきており，クルスク１号炉に対しては実施され，西側のレビューが計画されている。またレニングラード２号炉も長期の運転許可のよりどころとなる安全解析が行われ(西側資金)，ロシアの安全規制当局により審査中である。しかしながら全体としては，RBMKの安全性確認に関し，西側諸国と協調性を持って実施していく状態にはまだ程遠い。



第Ⅲ-5図 イグナリナ原子力発電所

6. まとめ

RBMKに係わる国は，ロシア，ウクライナ，リトアニアの３国である。ウクライナではチェルノブイリ閉鎖後の問題のみが残り，リトアニアでは１号炉の閉鎖が決まっている。

このリトアニアの２炉は西側の専門家の監視の下，安全性向上のための行為がかなり実施されてきており，炉の技術的特性も明確に把握され，チェルノブイリ事故以前に比べ格段に安全性が改善されている。しかし，出力制御の難しい大型の炉であることや，格納容器が設置されてないなど，本質的な設計上の弱点は当然そのままであり，RBMK自体の安全性には限度があるといわざるをえない。

一方，ロシアでは各RBMKとも運転を継続する予定であり，独自の安全性向上策がとられている。しかしながら国際的に評価のできる手法による安全解析の実施や国際的評価行為が遅れており，その安全性については不明確な部分が多い。このように西側諸国との協調が遅々として進まない状況の中での運転継続は，西側社会からは理解が得られないであろう。

チェルノブイリ事故以前にも，1975年にレニングラード原子力発電所で圧力管の一部損傷事故が発生したが，その原因追及の結果は安全性向上策として反映されずに終わった。また1983年には，イグナリナ原子力発電所でポジティブ・スクラム事象が発見されたが，この情報もその後の設計に反映されず，現場にも通報されなかった。このようにRBMKの設計上の欠陥があったことは明白であるが，それ以前に原子力発電所を設計，管理する関係者の安全に対する意識，すなわちセーフティカルチャーが重要であることが浮き彫りにされる。

我が国を始め，世界各国のどの原子力発電所も高い安全性を維持していくことが，原子力発電を地球上で継続的に実施していく上で，必須であり，要求される。同じような事故を起こさないためには，各国とも正確な事故情報を世界に向けて公表することが大切である。事故に係わる情報の透明性と迅速な対処がいつの時代でも重要である。個々のレベルにおいても関係者は公表された資料を読み，自分の知識として蓄え，また責任のある同僚にも伝えること

が，基本的行為として必要である。

——参 考 文 献——

1) パーソナル・コミュニケーション，2001年3月.
2) V.N. Gerasko, *et. al.*, *UNIT "SHELTER"*, Ukratomizdat, (1998).
3) デーヴィド・ホロウェイ著，川上 洸・松本幸重訳，スターリンと原爆(上・下)，大月書店，(1997).
4) D.I. Blokhintsev, N.A. Nikolayev, "The First Atomic Power Station of the USSR and the Prospects of Atomic Power Production", P/615, Geneva, (1955).
5) N.A. Dollezhal, *et. al.*, "Uranium-Graphite Reactor with Superheated High Pressure Steam", P/2139, Geneva, (1958).
6) A.M. Petroshants, *et. al.*, "The Leningrad Atomic Power Station and the Prospects for Channel-Type Boiling-Water Reactors", A/CONF. 49/P/715, Geneva, (1971), [in Russian].
7) N.A. Dollezhal, I.Y. Emeliyanov, *Channel Nuclear Power Reactor*, Atomizdat, Moscow, (1980), [in Russian].
8) M.A. ペトロシャンツ，ソ連原子力開発のすべて，日本原子力産業会議，(1981).
9) K. Almenas, A. Kaliatka, E. Uspuras, IGNALINA RBMK-1500, Ignalina Safety Analysis Group, Lithuanian Energy Institute, (1998).
10) E. Knoglinger, S. Chakraborty, "The Safety of RBMK Nuclear Power Plants", *Atomwirtsch.* Heft 2, Feb., (1998).
11) 武田充司，"リトアニア共和国イグナリナ発電所1号機の閉鎖をめぐって"，原子力誌，**42**〔12〕，1260 (2000).

Ⅳ. 事故現場の今

㈱原子力安全研究協会国際研究部　石 川 秀 高

1. はじめに

ウクライナの首都キエフから北に約30 kmのところに，チェルノブイリ原子力発電所は，森林や元々牧草地であったと思われるような静かなたたずまいの中，忽然と現れる。特にシェルターは異様な圧力をもって我々の目の前に現れる。

このシェルターは事故後，約半年かけて建設された。シェルターはウクライナ語ではウクルチェと呼ばれ，一般的にはサルコファーガス(石棺)とマスコミ等を通して認識されてきた。事故後10数年を経過した現在でも，シェルターの外観はほとんど変化なく，そして内部も当時の様子をそのまま伝えている。しかしながら，細部では少しずつ変化が認められている。

このシェルターはチェルノブイリ原子力発電所のシェルター・オブジェクトという部門が長年にわたり継続的に管理してきており，チェルノブイリ発電所関係者のみならず，ウクライナ内外の多くの研究者が種々の調査を行ってきている。最近ではいくつかの国際研究も実施され，シェルター改善の国際プロジェクトも進められている。

本章では，まず事故による破壊状況，シェルターの建設状況を振り返り，現在の状況，そしてシェルターをめぐる最近の動きをまとめる。なお，ここでは各国の研究者の統一した呼称である「シェルター」を使用する。

4号炉の事故による破壊やシェルターの建設は当時より関わりの深かったボロボイ氏(クルチャトフ研究所)による"石棺(サルコファーク)の内，外"(A.A. Borovoi, 1990年11月)や旧ソ連当時のチェルノブイリ原子力発電所事故影響清算全ソ連委員会によりまとめられた"チェルノブイリ・苦難の5年"(V.A. Gubanov, 他，1992年)に詳しい。内部の様子は，OECD/NEA主催の国際シンポジウム"石棺安全'94"(ウクライナ，1994年3月)やIAEA主催の国際フォーラム"チェルノブイリ10年後"(ウィーン，1996年4月)などに，ロシアやウクライナの研究者を中心として各種の報告がなされているとともに，同じくロシアやウクライナの研究者からの報告を中心にまとめた"シェルター：現状安全解析，今後の問題"(A.A. Borovoi, ら，1998年11月)などの文献がある。

最近のシェルターに係わる国際的な動きは欧州復興開発銀行(EBRD)のニュースレターやウクライナの国際チェルノブイリセンター(ICC)の機関誌"Insight"にまとめられている。

2. チェルノブイリ・サイト付近の気象状況や地盤[4)]

シェルターそのものの安全性を考えるとき，サイト付近の気象状況や地質構造は重要な要件となる。ウクライナ北部，ベラルーシと接する一帯は，昔からポレーシアと呼ぶ森林の多い，湿潤な地帯である。チェルノブイリもそこに位置し，年間を通じて湿度が高く，おおよそ3ヵ月間は雪に覆われている。サイトは20～30 m深までの砂地盤で，表層も足で踏むと沈み込むような細かい砂で覆われている。地下水は現在，シェルター下部2～3 mのところに存在している。

これらの概要を簡単にまとめると次のようになる。

気　温：約－5℃(1月の平均)～＋19℃(7月の平均)，最低気温記録－44.9℃，最高気温記録＋42.2℃
年間相対湿度：約77%
雪に覆われる日数：約90～100日/年(平均積雪量，約8～17 cm)
竜巻通過確率：3×10^{-6}/年
地下水位：111.3 m(海面からの高さ，シェルター設計上の基盤面は114.0 m)
地　質：砂地盤(海岸堆積物，川底堆積物等)で約20～30 m堆積し，その下部は石灰質粘土(8～12 m)である。

3. 4号炉の事故による破壊の概要[2～4, 7)]

事故時に原子炉内で起こった爆発は大きな破壊力を持っ

ていた。原子炉そのものから原子炉建屋の天井，壁，そして幾つもの部屋が，全体的に南北方向に大きく破壊された。(**第 Ⅳ-1 図**)。このため，原子炉は大気にオープンとなり，原子炉内の燃料や黒鉛ブロックも中央ホールや外部環境へ一部飛び出し，原子炉内ではこれらが下部に落下し堆積した。

事故による施設破壊の特徴的な状況(概要)は以下のようにまとめることができる。

(原子炉)

・原子炉は完全に破壊され，空洞状況で種々のデブリや破片等が原子炉底に落下し，堆積した。

・原子炉上部の重量2,000 t を超える上部遮へい盤は事故時に持ち上がり，回転，落下し，垂直に対し15°の角度で原子炉室に引っかかった状態になった(**第 Ⅳ-2 図**)。

・下部遮へい盤は 4 m 落下し，支持構造物を押しつぶし，南東部分1/4が消失した。

(中央ホール，使用済み燃料プール)

・中央ホールの屋根，壁は激しく破壊され，北側の気水分離器室の壁も破壊された。

・中央ホール内は崩壊した構造物の破片やヘリコプタから投与された物質(ホウ素化合物，ドロマイト，砂等約5,000 t 投下)で埋め尽くされ，場所によっては1.5 m も堆積している。

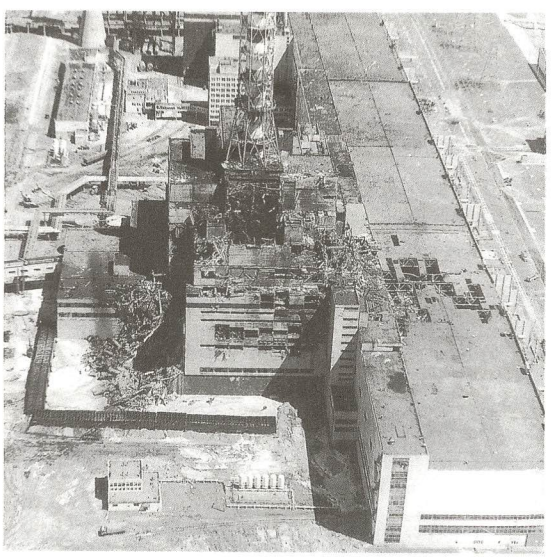
・使用済燃料は原子炉すぐ横の使用済燃料プールに保管されていた。南プールの水は流出したが，燃料集合体は大きな被害を受けていない(北プールには何も貯蔵されていなかった)。

(他)

・北側の主循環ポンプ室(南北にそれぞれ存在)は激しく破壊された。

・原子炉南側のデアレーション・スタックの上部 2 階部分は破壊し，建物の柱はタービンホール側へ変形した。

・タービンホールの原子炉付近の屋根は事故時のデブリで破壊し，梁や柱にもズレが生じた。



第 Ⅳ-1 図　事故時の全体の状況

4．シェルターの建設，構造

(1)　建設の経緯[3, 7]

事故直後の1986年 5 月中旬，大気にオープンとなった事故炉からの放射性物質の放出を食い止め，サイト周辺の放射線環境を改善するために，当時の政府委員会は 4 号炉を長期隔離することを決定し，事故炉を覆うシェルターの建設が決定された。その概念として全部で18の案が検討されたが，大きく以下のような 2 つのグループに分かれた。

・スパン230 m のアーチ，ないし直径120 m のドームのような巨大な構造物

・残された構造物を効果的に利用し，壁等を新たに建設し全体を覆う構造物

これらに対して技術的，経済的な観点から検討を行った結果，前者は建設に1.5～2 年を必要とし，後者は数ヵ月で建設が可能との判断から後者が採用された。設計は 5 月20日～8 月20日まで行われ，完成したところから順次作業された。最終的に11月に完成した。作業は昼夜行われ，作業員総数は 1 万人に達している。

(2)　4 号炉周辺の除染[1]

シェルター建設に先立ち，事故炉周辺の放射線状況を改善するために周辺区域の除染を行い，爆発により放出された放射性の破片や非常に汚染の高い土はコンテナに入れ，4 号炉内や埋設地に搬出された。その後，4 号炉周辺区域は1.5 m の高さまで砂利，砂およびコンクリートで覆われた。

(3)　シェルターの建設の実際[1, 3, 4, 7]

シェルターの建設はいかに隣接している 3 号炉を隔離

第 Ⅳ-2 図　事故時の上部遮へい盤

し，そしてできるだけ既存の残された構造物を利用し，効率的に建設するかということに多くの努力が払われた。このため，現場の状況を詳しく把握しながら設計を繰り返し行い，並行して建設が進められた。以下に建設のポイントをまとめる。

（作業開始）

・4号炉の北側に高さ6m，南側，西側には高さ8mの鉄筋コンクリート壁が打設され，建設作業時の安全性が確保された。

（東側部分）

・3号炉と4号炉の間に仕切り壁が作られ，両炉が隔離された。

（西側部分）

・西側は外側からカバーするように，総重量1,000tのバットレス付きの金属製大型ユニット（1ユニットは高さ約45m，幅6m，重量約165tの鋼製枠）が組み立てられた。

（北側部分）

・北側は高さ12mまでカスケード状にコンクリート構造物が作られ，上段になるに従い，できるだけ事故炉に接近するように打設された。内部には搬出された破損金属構造物が放り込められた。

（南側部分）

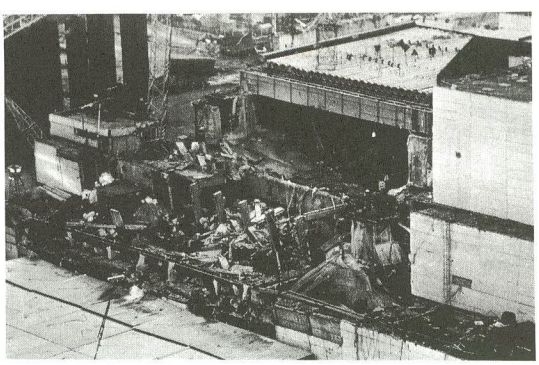
・厚さ2.3mのモノリス壁がタービンホールと原子炉室間に基準高さ＋19mまで打設され，また南側デアレーション・スタックを分離する厚さ1mの鉄筋コンクリート壁が打設された。

・原子炉建屋南側の既存のコンクリート構造物上に巨大な鋼製の梁（マンモス・ビーム）を設置し，主支持梁とした。

・タービンホールの破壊した屋根部分は補修した。

（天井部分）

・破壊した原子炉のある中央ホール上部に既存構造物上に鋼製梁B1/B2を2セット架設し，それに直角に金属パイプ（直径1,220mm，長さ34.5m）を27本並べ，その上に大寸法の6枚のモジュール・プレートを葺き，天井部分とした（**第Ⅳ-3図**）。



第Ⅳ-3図　シェルター建設（中央ホール天井部分）

完成したシェルターの南北断面図，東西断面図をそれぞれ**第Ⅳ-4，5図**に，さらに外観を**第Ⅳ-6図**に示す。

5．シェルター内部の状況

シェルター内部は種々の構造物が破壊され，しかも高線量域下であるため，正確にその状況をつかむのは困難な状況にある。しかしながら，内部の状況を少しでも正確に把握することは安全管理を行っていく上で，非常に重要であるため，多くの努力が払われてきた。

（1）　内部の観察[1,3]

内部の様子，特に炉心がどのようになっているのか，燃料はどのような状態なのかにまず注意が払われた。事故後3年間で約70のボーリングがなされ，線量測定やペリスコープ，またビデオ観察もなされた。また事故直後には計160個の各種測定器を備えた15個の“ブイ”（円錐系の測定設備）が設置され，さらに中央ホール上部や原子炉内の残骸上部に放射線検出器や温度測定器等を設置した総合情報調査システム“Finish”が構成されたり，もう少し広い場の情報の測定システム“Shater”なども設置され，正確なモニタがなされるようになってきた。これに加え，目視による調査も多く実施され，有効な情報源となったことはいうまでもなく，このような多くの努力で，現在多くのことが正確にわかり始めている。

（2）　燃料の様子[2,3,5,6,8]

事故によって炉心は完全に破壊され，炉心に装荷されていた燃料（約190.2t）は3つの形態で分散した。この95%以上がシェルター内に存在しているとされている。

(a)　集合体，燃料棒そのものや，その破片

建屋上部の中央ホール，原子炉室に散乱。建設された北側のカスケード壁の下にもあり，建屋外部にも一部は放出した。

(b)　高放射性ダスト形態

微細化した燃料粒子で，コンクリート壁，床，天井に付着。空気中にはエアロゾルとして存在。

(c)　溶岩状燃料含有物質（LFCM）

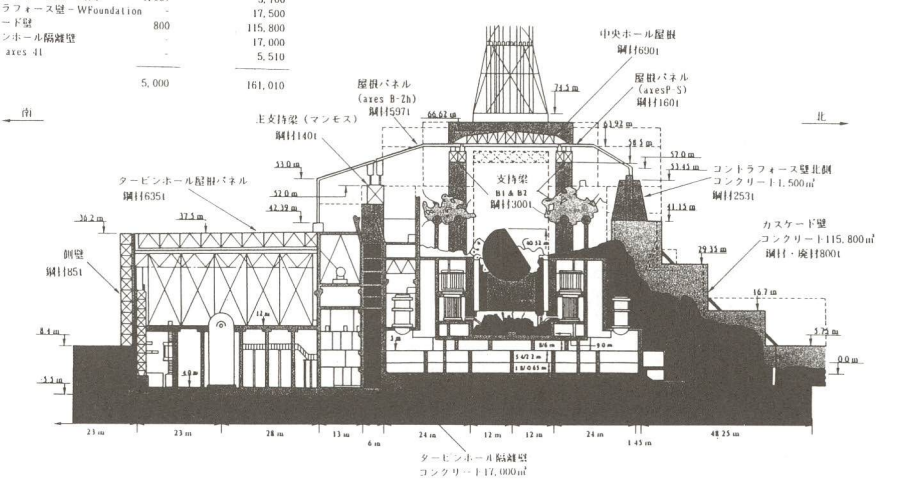
燃料が多量の構造材と混合して溶融一体化し，固化したセラミックス状のもの。

環境に対し，より注意が必要なのは(b)のダスト化したもので，事故時に6～8tの微細状燃料が放出されたともいわれ，シェルター上部部分では現在約30t存在し，さらに増加しつつある。これらは直径数100μmの大きい粒子から数μm以下まで分布している。

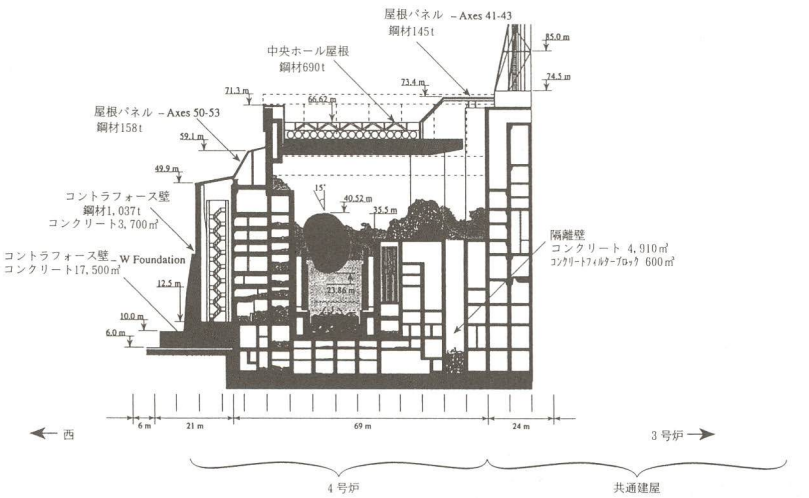
(c)の燃料含有物質（LFCM，燃料の量でおおよそ135±30t）はその形成過程により，原子炉下部より3つの大きな流れが確認されており，LFCMそのものにも違いが認められている。

大垂直流：原子炉下の蒸気分配回廊を通り，さらに下の

シェルター部材	金属重量（t）	コンクリート量（m³）
中央ホール屋根	690	-
屋根パネル-axes P-S	160	-
屋根パネル-axes B-Zh	597	-
屋根パネル-axes 41-43	145	-
屋根パネル-axes 50-53	158	-
タービンホール屋根パネル	635	-
はり，タービンホール壁	85	-
支持梁B1&B2	300	-
主支持梁	140	-
コントラフォース壁－北側	253	1,500
コントラフォース壁－西側	1,037	3,700
コントラフォース壁－WFoundation	-	17,500
カスケード壁	800	115,800
タービンホール隔離壁	-	17,000
隔離壁 axes 41	-	5,510
	5,000	161,010



第 IV-4 図　シェルター南北断面図



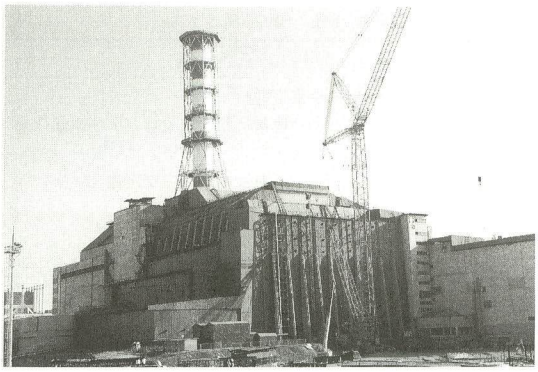
第 IV-5 図　シェルター東西断面図

2段のサプレッションプールの下段まで到達した茶色セラミックス(**第 IV-7 図**)。

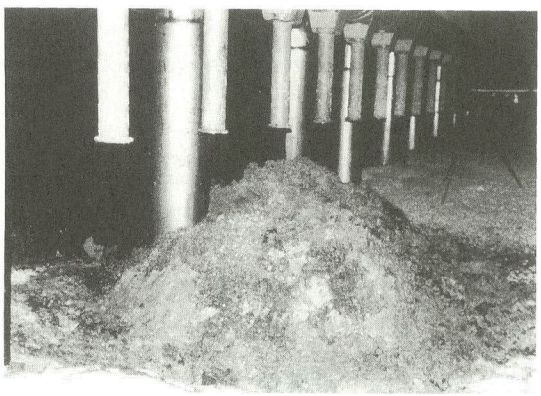
小垂直流：大垂直流と同様の流れであるが，流れ出た部屋が少し異なり，サプレッションプール上段の途中まで達している黒色セラミックス。

水 平 流：原子炉下部から水平に東側方向に最大約50 m移動した黒色セラミックスで，そのほぼ先端に“象の足”がある(**第 IV-8 図**)。

このLFCMは年月を経るに従って，その置かれている場所により，大小さまざまなクラックが入り，表層からダスト化が認められるものもある。このようなダストの舞上がりを押さえるためのポリマーの覆いも研究が進められている。なお，各種のダストを押さえるために，中央ホール天井にスプリンクラが設置され(1991年)，定期的に特殊溶



第 Ⅳ-6 図　完成したシェルター外観



第 Ⅳ-7 図　サプレッションプールのLFCM(水は事故直後に抜かれている)

液が散布されている。

(3) 燃料の核的安全性[1,3,4,7,8]

シェルター内の特にLFCMとして大きな塊に閉じ込められた燃料が，事故後も臨界状態になる可能性があるかどうかについては最も懸念される問題の1つであり，深い検討を必要とする事項である。このため，事故直後からその核的安全性が注意深く調査されてきた。自発中性子線を利用するパッシブな中性子手法，また中性子を注入しその後の中性子束減少の時間依存性を測定するアクティブな中性子手法などが多くの研究者により適用され，測定，検討された。その結果，現在LFCM内の燃料は未臨界状態にあり，再臨界の可能性は限りなく低いと評価されてきている。

なお，LFCMが多く集まっている部屋を中心にその核的安全性を確認するために，ボーリング孔先端などに設置された中性子検出計により，現在まで常時モニタリングされている。

(4) シェルター構造物の安全性[1,2,4,7]

シェルターは建設当時20～30年の設計寿命，リヒタースケール(旧ソ連の地震スケール) 6～7 に耐え得るように設

第 Ⅳ-8 図　象の足

計され，竜巻も考慮されている。しかし高放射線下で短時間で建設せざるをえなかったこともあり，いくつかの問題を抱えている。

なお，建設時に多量のコンクリートが注入され(フレッシュ・コンクリートと称している)，シェルター内の至る所に流れ，固化した(この固化コンクリートは多くの部屋へのアクセスを悪くしている)。

シェルター構造物の安全性に係わる問題点は以下のようにまとめることができる。

(1) 主要構造物は溶接やボルトによる接合部なしに建設されているため，構造物を完全に固定することは不可能である。現在10数年を経過し，中央ホール天井部分を支える梁B1/B2が既存壁との間で若干ずれが生じ，国際プロジェクトであるシェルター改善計画(SIP)で補修，強化された(後述)。

(2) 非常に重量の大きい構造物を支える既存の壁は事故時の衝撃で被害が見られるものもあり，荷重の大きくかかる部分は局所的な補修がなされてきている。また，3号炉/4号炉共通のベンチレーション・スタックは支持構造物に損傷を受け，倒壊の可能性があるため，国際プロジェクトのSIPで優先的に補修された(後述)。

(3) 鋼製パネルを組み合わせて天井部分や壁を建設しており，この隙間はすべて合わせると1,000 m^2あると評価されている。この隙間を通し，雨，雪等の水分が年間を通して入り込み，蓄積されることになる。これら水分は中央ホールの除染のために使われるホウ素炭化物や核的安定性のために投与される無水ホウ酸カリウムによって，一部酸性化してきている。また，このような隙間を通し，放射性ダストのシェルター外への放出も懸念され，数ヵ所でモニタリングが常時実施されている。なお現在は，前記のスプリンクラ等により，その放出は押さえられ，効果が上げられている。

(4) シェルター内(原子炉建屋)にどれほどの放射性物質を含んだ水が蓄積されているかは，正確に評価することは難しいが，1996年当時で約3,000tとの評価がなされている。

(5) 斜めに傾いて引っかかっている原子炉室上部の上部遮へい盤は，一時期落下の危険性が懸念されたが，現在ではその可能性は非常に低いと評価されている。

6. シェルター改善をめぐる国際的な動き[9~11)]
チェルノブイリ・シェルター基金(CSF)/シェルター改善計画(SIP)

(1) 経緯と目標

現在のシェルターの構造上の弱点があることは当初から指摘されており，1990年頃より新たな第2シェルターの必要性が一部でいわれ始めた。1992年から1993年にかけてウクライナ主催の第2シェルターの設計国際コンペが実施され，その後，国際レベルで適切な解決を図ることが提案され，1994年からはECのTACISプログラムとして第2シェルターのフィージビリティ・スタディが開始され，再評価を繰り返し，1997年に5月にシェルター改善計画(Shelter Implementation Plan: SIP)がまとまった。SIPの目指すところは，構造の安定化を図り，崩壊の可能性を低減し，原子力安全性を改善し，作業面/環境面の安全性を向上させ，その上で環境に安全なシステムに転換していく長期戦略を検討するものである。

このSIPの実施のために，先進7ヵ国やヨーロッパ諸国を中心とした計23ヵ国(現在22ヵ国)とECによる拠出金を基にチェルノブイリ・シェルター基金(CSF)が1997年12月に設置された。なお我が国も応分の協力をしている。この基金は欧州復興開発銀行(EBRD)の管理下におかれ，EBRD内に運営グループが発足し，対処している。

(2) 計画，実施状況

SIPは22のタスク(**第Ⅳ-1表**)，297の作業項目で成り立っており，計8~9年のスケジュールが見込まれている。現時点での総予定額は7.68億$である。この作業項目のうち，調査事項的なもの，初期作業的ものが第1フェーズと位置付けられ，1998年から実質的な作業/調査が開始され，2000年夏から秋に終了し，順次，次のステップの第2フェーズに移行が予定されていた。現在，スケジュールに若干遅れが生じており，まだ第2フェーズは順調に軌道に乗ってはいない。

第1フェーズの作業項目は次の4つに大きくグループ化されている。

A：建設，構造(構造安定化設計，構造調査，地質調査，安全閉じ込め戦略，他)

B：運転，モニタリング(耐震特性/モニタリング，放射線防護計画，構成物の安全性/火災安全インフラ，等)

C：緊急システム(緊急事対応，ダスト管理，緊急ダスト抑制システム，等)

D：燃料含有物質(初期特性，取出し技術開発，等)

第Ⅳ-1表 SIPの構成タスク

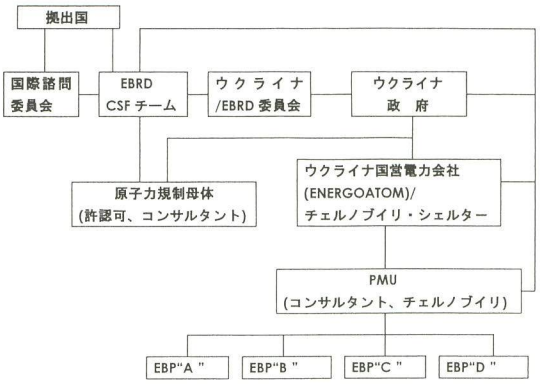
タスク名	内容
1. 崩壊可能性の低減(構造安定性)	
タスク1	安定化および遮蔽に関する設計および準備作業
タスク2	西側部分の安定化
タスク3	マンモスビームおよび南側の安定化
タスク4	東側および北側部分の安定化
タスク5	屋根部分の安定化
タスク6	構造に関する調査およびモニタリング
タスク7	地質に関する調査
タスク8	地震特性の調査およびモニタリング
2. 崩壊事故の影響低減	
タスク9	緊急時への対応
タスク10	ダストの管理
タスク11	緊急時のダスト抑制
3. 原子力安全の向上	
タスク12	臨界および原子力安全
タスク13	内部水の管理
タスク14	燃料含有物質(FCM)の特性調査
4. 作業者および環境安全の向上	
タスク15	放射線防護プログラム
タスク16	機器の安全，火災防護 インフラストラクチャーおよびアクセスの管理
タスク17	総合モニタリングシステム
タスク18	総合データベース
5. 長期戦略および環境的に安全なサイトへの転換の検討	
タスク19	FCM除去と廃棄物管理方策検討
タスク20	FCM除去技術開発
タスク21	安全封じ込め方策
タスク22	新閉じ込め構造実施

これらA~Dの4つの作業(EBP：Early Biddable Project)の遂行組織(国際コンソーシアムが主体)や，それらを統括し，EBRDやウクライナ政府と調整を図るという重要な役割を負うPMU(プロジェクト管理ユニット)は入札行為で決められた。第1フェーズを進める上での全体組織を**第Ⅳ-9図**に示す。国際諮問委員会(IAG：International Adviory Group)は10ヵ国11名の専門家で構成され，SIPの状況や重要案件について技術的な立場で大所，高所的に検討，判断している。我が国からも武田充司氏がメンバーとなっている。

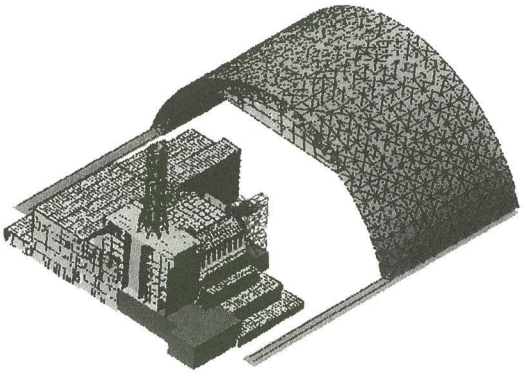
以下に優先的に実施された補修/強化事項や特徴的な事項についてまとめる。

(a) 構造安全性に係わる緊急補修/強化

SIPでは構造上の安全に関わる緊急的に補修が必要な作業が優先され，特に3号炉/4号炉のベンチレーション・スタックと，梁B1/B2の補修/強化が優先された。前者はスタックを支えるジョイント部分が破損し，倒壊の可能性があったため，SIPの最初の作業として補修工事が実施された(1998年，米，カナダ，ウクライナ3国の先行拠出により実施)。後者は既存の西壁と東側構造物間に渡した梁に若



第 Ⅳ-9 図　チェルノブイリ・シェルター基金(CSF)組織構造



第 Ⅳ-10 図　新安全閉じ込め構造物(NSC)

干ズレが生じたため，既存の西側壁への荷重の分散を図り，今後のズレを防止するための補修/強化をしたもので，1999年12年終了した。この梁B1/B2補修は非常に高線量環境下での作業であったため，放射線防護上の工夫を行い，注意深く実施された。この経験が今後実施していく中央ホール屋根，西壁，南側屋根部分等の補修作業に大いに参考となる。

(b)　新安全閉じ込め構造物

SIP の最終目標は新安全閉じ込め構造物(NSC：New Safe Confinement)の建設である。このNSCは現シェルターの自然環境による劣化を防止し，万が一の倒壊による放射性ダストの環境への放出を防ぎ，そして今後の不安定部分の解体等の安全な作業環境を提供し，放射性廃棄物管理を可能にしようとするものである。過去2年間以上，10の概念が検討され，最終的に3つの案の中から，2001年4月，**第Ⅳ-10図**に示すアーチ型の採用が決定された。このアーチ型は構造上，またコスト的にも最も効率的で，今後の不確定要素にも対処できる柔軟な設計を持ち，そしてシェルター横で組み上げて正位置まで移動する手法のため，作業員の放射線防護上も効果的といわれている。

(c)　燃料含有物質(LFCM)の取出し

シェルター内各所に散在している全体1,000 tを超えるLFCMの取出しは，安全性維持の観点からは長期的に必要事項である。このためにSIPではその取出し手法を確立することが大きな目標の1つであり，現在その検討を進めている。実際の取出しは現SIPと別に実施されることとなる。

7．国際的研究の動き[12)]
国際チェルノブイリセンター(ICC)

事故後10年を経た頃，シェルターや周辺環境を科学的研究の場としてとらえる見方が先進7ヵ国を中心に生まれ始めた。ウクライナ国内でもチェルノブイリに関わる国際研究の一元的な把握の必要性がいわれ，またチェルノブイリ閉鎖後の従事者の街スラブチッチの社会的，経済的な行く末を検討する必要が指摘され始めた。このような動きを背景に，ウクライナ政府の下，今後のチェルノブイリの国際研究を一元的に扱う国際チェルノブイリセンター(ICC：International Chornobyl Center for Nuclear Safety, Radioactive Waste and Radioecology[a)])が1996年に設立された。米国，英国，ドイツ/フランス，日本の各国はそれぞれウクライナと2国間の文書を取り交わし(ドイツ/フランスは協同で対処)，それぞれ独自の研究を開始した。なお，それ以外の国では，イタリアが現在，ウクライナ側と協議中であり，カナダも検討中である。

ICCでの国際研究分野は，施設の除染/廃止措置，放射性廃棄物/使用済燃料管理，放射線の健康影響/環境影響，安全評価，緊急時計画，等と多岐にわたっており，すでに工学技術研究所(スラブチッチ)，国際放射線生態学研究所(スラブチッチ)，安全解析研究所(キエフ)が付設され，機能し始めている。組織の概要を**第Ⅳ-11図**に示す。

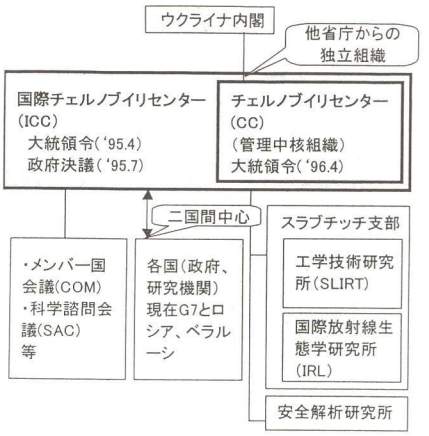
我が国では，科学技術庁(現，文部科学省)が平成10年度より事故施設の除染/廃止措置，施設の安全性への転換やサイト周辺地域の環境影響に係わる各種の研究を実施してきている。

8．まとめ，最近の研究課題

チェルノブイリのシェルター内部やサイト周辺環境への放射線影響は，事故後10数年を経た現在でも技術的に十分明らかにされてはいない。

例えば，シェルター内部の原子炉下部では燃料含有物質(LFCM)が各所に存在している。このLFCMは燃料が砂等の構造物と混合/溶融し，固化したもので，おそらく原子炉下部で溶融一体化し，垂直方向や水平方向に流れ，固化したものと考えられる。このようなLFCMは金属やコンクリート構造材とどのように関わり合ったのか，どの程度の粘性をもって動いたのか，そして固化体の内部はどの

[a)] ウクライナ語を英語表記した場合，チェルノブイリはChornobylとなる。



第 Ⅳ-11 図　国際チェルノブイリセンター(ICC)組織

ようになっているのか，など技術的興味は尽きない。さらに，事故時に原子炉内部では爆発が起こっているが，どのような力がどのように働いたのかについてもよくわかっていない。このようにLFCMの挙動やその固化プロセス，そして事故時の原子炉内部の様子の解明は，旧ソ連型炉とは異なるタイプの原子炉に対しても，非常に苛酷な事故時の挙動把握に重要な知見を与える可能性がある。

事故炉からは事故当初，多くの放射性物質が環境に放出された。その多くは30km圏内に降下した。しかしながら当時の気象条件によって量的にはわずかであるが，一部の地方では広域に放射性物質が飛散，降下した。これらの地域の住民の居住地域や農耕地などでは除染作業が行われたり，耕作による放射性物質の状態の変化が生じているが，ほとんどは事故以降そのままの状況にある。現在，それら放射性物質はどのように化学的/物理的に変化してきているのか，環境復旧させるためにはどのようにしたらよいのか，などについても技術的知見は少ない。

チェルノブイリ事故は我が国とは違う炉型の事故であり，同様の事故は我が国では起こりようがない。しかしながら事故後の様子は，見方を変えると我々に多くの安全性に係わる技術的知見や実証データを与えてくれる可能性がある。このためますます研究を進め，原子力を進める国々がこの原子力の技術的遺産を共有する必要がある。

——参 考 文 献——

1) A.A. Borovoi, 石棺(サルコファーク)の内, 外, ネイチャー, No. 11, (1990).
2) S.T. Belyayev, *et al.*, "Technical Management on the Chernobyl Site-Status and Future of the Sarcophagus", ENS Int. Conf., Nuclear Accidents and the Future of Energy-Lessons learned From Chelnobyl, Paris, April 1991.
3) V.A. Gubanov, 他, チェルノブイリ—苦難の5年, モスクワAT出版, (1992).
4) Academy of Sciences of Ukraine, *Description of the Ukritiye Encasement and Requirements for its Conversion*, (1992).
5) A.N. Kisseles, *et al.*, "Lava-like Fuel-containing Masses in Unit 4 of Chernobyl NPP", OECD/NEA In. Symp. "Sarcophagus Safety '94—The State of the Chernobyl Nuclear Power Plant", Ukraine, 1994.
6) E.M. Pazkhin, "Fuel-Containing Lavas of the Chernobyl NPP Fourth Block: Topography, Physicochemical Properties, and Formation Scenario", *Radiochemistry*, **36**[2], (1994).
7) A.A. Borovoi, "Chernobyl Sarcophagus: Safety problems", IAEA International Forum "One Decade After Chernobyl: Nuclear safety Aspects", Vienna, April 1996.
8) A.A. Borovoi, *et. al.*, *The Shelter's, Current Safety Analysis and Sisuation Development Forecasts* (Updated Version), (1998).
9) EBRD, Chernobyl Shelter Fund NEWSLETTER, Issue 3, (1998).
10) EBRD, Chernobyl Shelter Fund, (2000).
11) EBRD, Newsletter of the Nuclear Safety Unit, (2001)
12) ICC, "Insight", Issue 1, (1998).

V. 事故の医学的影響

㈶放射線影響研究所　長 瀧 重 信,
長崎大学医学部附属
原爆後障害医療研究施設　山 下 俊 一

長崎大学奉職中1990年，旧ソ連時代から現地の調査に参加し，笹川記念健康協力財団，外務省などの日本のプロジェクトに加え，WHO, IAEA, EC, などの国際機関の調査あるいは国際シンポジウムに参加した。

チェルノブイリ事故の医学的影響調査研究から我々が学んだことの第1は，放射線の健康影響を科学的に解明する基本的な条件は，①被ばく線量の測定，②調査集団の確定と正確な病気(病的状態)の診断，そして③的確な疫学的，統計的な方法の採用という従来の鉄則を確認したことである。

第2は，科学的な調査結果の国際的共通認識が形成されたとしても，"一般公衆の大規模な被ばく"という社会的に形成された認識とのギャップの説明，また時代とともに変化する一般大衆の調査結果に対する要求への対応を学んだことである。

10周年に行われたWHO, EC, IAEAなどの国際シンポジウムの共通認識は，急性被ばくを受けた現場の職員，消防夫などを除いた被ばくした一般公衆の科学的に証明された健康傷害は約1,000人の小児甲状腺癌だけで，白血病を含めその他の疾患の増加は認められず，在郷軍人を主とする数10万人の除染作業者に健康傷害が報告されているが，国際的に承認されないというものである。一昨年公表されたUNSCEAR(国連科学委員会)の報告でも大きな変化はない。放射線の影響を科学的に解明する基本的な条件が必ずしも満たされないことが要因である。

一方，社会的に形成された認識，被ばくを含め事故に対する補償の要求と調査結果の国際的共通認識との違いに対

する対応は，原子力発電のみならず，原子力利用に関する現代社会の諸問題の縮図とも考えられ，解決のためのいろいろな模索が行われることになる。解決がどの方向に行くかは，その時代，その地域に存在する一般公衆の決定にゆだねられるのではないだろうか。　（長瀧重信）

1．はじめに

チェルノブイリ原子力発電所事故から10年目にはすでに国際原子力機関（IAEA）や世界保健機構（WHO）などが，被ばく者の健康影響についてまとめている。急性放射線被ばく問題では，消防士や除染作業者らに甚大な健康被害を及ぼし，31名の死亡者を出し，数多くの直接被ばく者問題が明らかにされている。そのため，これら除染作業者のきめ細かい定期的な追跡調査の必要性が取り上げられているが，個々人の推定被ばく線量の再評価問題とともに，ソ連邦崩壊に伴う数10万人の除染作業者らの離散問題，社会経済問題や補償問題も絡み，正確な健康影響調査が困難となっている。この間，WHOや国際がん研究機関（IARC）などでは，ロシア国内における除染作業者の登録，追跡調査をサンクトペテルブルグやオブニンスクの放射線医学研究所と共同で展開している。事故後15年を迎え，これら除染作業者の中にも白血病や甲状腺癌などが増加したとの現地発表もなされているが，更なる検証が必要であり，今なお一定の結論を導けない状況にある。

一方，事故前からチェルノブイリ周辺に生活していた400万人にも上る一般住民に対する健康影響は，どの程度解明されたのだろうか。1986年4月26日未明の事故直後から数ヶ月の間に，短半減期の放射性ヨード類を中心とする放射性降下物の影響を直接，間接的に受けた一般住民（とりわけ乳幼児や妊婦）に対する健康影響が，原子力防災面では最大の懸案事項となっている。本章では，最大規模の現地調査であるチェルノブイリ笹川プロジェクトの10年間の活動成績を中心に報告し，2001年5月30，31日とモスクワで開催されたチェルノブイリ笹川国際シンポジウムの内容から，最近5年間の現地調査に基づく健康影響の現状と問題点などを地理的情勢に鑑みて紹介する（**第V-1表**）。

2．甲状腺影響調査報告

原爆被爆者では甲状腺がんの発症リスクが高い。一般に成人の甲状腺がんは，術後5年生存率が95%以上と他のがんに比し非常に予後が良い。そのため長期観察や疫学調査の対象として理想的な疾患となっている。同時に無症状で偶然検診などで発見される頻度も高く，生涯生命に異常をもたらさない場合も多い。我が国では年間1,000名前後が甲状腺がんで死亡している。しかし，小児甲状腺がんの実態は長らく不明で，その発見頻度は通常年間100万人に1人程度と少なく，極めて稀な疾患でもある。このような背景から放射線被ばくによる晩発性障害の代表疾患として甲状腺がんが明らかにされているものの，小児を対象にした影響調査は皆無に近い状況であった。

特にチェルノブイリ周辺における小児甲状腺がん激増の最初の報告に関しては[1,2]当時，検診効果によるがん発見頻度の増加や，不適切な疫学統計処理，さらに診断基準の違いなどが議論されていた。しかし，事故前後での患者数の激変や周辺汚染地域での特異的な現象から，1996年の種々の国際会議では，専門家の一致した意見として，「チェルノブイリ原発事故後，周辺住民への放射線被ばくにより増加した病気は，唯一小児甲状腺がんである」と認められた[3~5]。ベラルーシ，ウクライナに引き続き，その後，ロシアでも隣接するブリヤンスク州などにおいて小児甲状腺がんの増加が確認されている[6]。そのため，チェルノブイリ周辺では，小児甲状腺がんの症例・対照調査検討[7]や，精確な疫学調査が開始されている。

しかし，最大の問題点は，個人の甲状腺被ばく線量や全身被ばく線量の推定再評価が極めて困難であり，不確かな情報（事故直後の放射能汚染食物の制限，予防的ヨード剤の適切な投与，事故前後のヨード欠乏状況の掌握，甲状腺直接被ばく線量測定の精度）なども加わり，1991年以降の聞き取り調査の正確さも年を経るほど疑問視されている。その上，周辺住民は，^{137}Csを中心とする比較的半減期の長い放射性降下物による低線量ながら慢性外部被ばくを受けるという現実問題や，汚染地域からの食物を経口摂取するために，継続する体内被ばくという問題を抱えている。実際

第V-1表　国際チェルノブイリ笹川シンポジウム：21世紀への教訓（モスクワ）プログラムの要旨

International Chernobyl Sasakawa Symposium; Message for the 21st Century: Lessons from the Chernobyl Sasakawa Health and Medical Cooperation Project

Date:　May 30 and 31, 2001, Venue:President Hotel, Moscow

Organized by Sasakawa Memorial Health Foundation

In cooperation with World Health Organization, Ministry of Health of the Russian Federation, Ministry of the Russian Federation for Civil Defense Emergencies, and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM) and Medical Radiological Research Center, Russian Academy of Medical Sciences

Main Scientific Programs Focused on Thyroid Problems

1.Reports from 5 centers
- (1) Mogilev Regional Diagnostic Center
- (2) Gomel Specialized Diagnostic Center
- (3) Bryansk Regional Diagnostic Center No. 2
- (4) Korosten Inter-Area Medical Diagnostic Center
- (5) Kiev Regional Hospital No. 2

2. Overview of Thyroid Diseases around Chernobyl
- (1) Belarus: *Evgueni Demidchik*
- (2) Ukraine: *Nikolai Tronko*
- (3) Russia: *Viktor Ivanov*
- (4) Comments from Japan: *Shigenobu Nagataki*

3. Results of New Chernobyl-Sasakawa Projects
- (1) Case-Control Studies in Russia and Belarus
  Elizabeth Cardis (International Agency for Research on Cancer, WHO
- (2) Estimation of radiation dose in radiocontaminated areas
  Masaharu Hoshi (Hiroshima University)
- (3) Comparative Study in Gomel
  Yoshisada Shibata (Nagasaki University)
- (4) Post Chernobyl NIS Thyroid Tissue, Nucleic Acid and Data Banks
  Gerry Thomas (University of Cambridge)
- (5) WHO-SMHF Health Telematics Project
  Michael Repacholi (WHO)

4. Lessons from Chernobyl and Message for the 21st Century
  Martynovskiy V.V.,Head, Mogilev Regional Health Bureau
  Yakovlev A.M.,Head, Bryansk Regional Health Bureau
  Elagin V.V., Head, Kiev Regional Health Bureau
  Paramonov Z.M.,Head, Zhitomir Regional Health Bureau
  Bruce Wachholz (National Cancer Institute, USA)
  Shigenobu Nagataki (Radiation Effects Research Foundation, Japan)
  Diederik Teunen (EC)
  Michael Repacholi (WHO)

5. Sasakawa-Moscow Declaration

にこれら体内外からの長期低線量放射線被ばく影響の有無が判別不可能という極めて困難な状況をかもしだしている。そのため，激増した小児甲状腺がんの原因が，種々憶測こそあれ同定されずにいたのが，この事故後15年間である[8,9]。

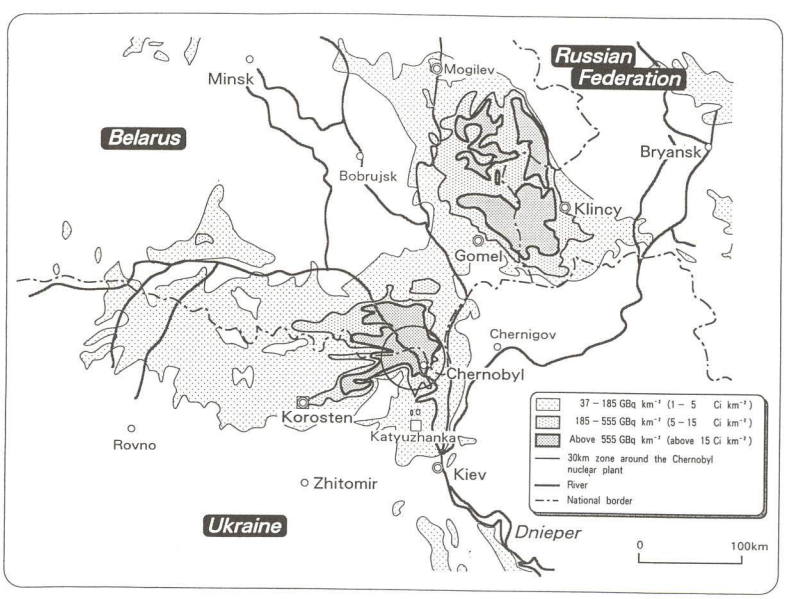
上記渦中で1991年5月から1996年4月まで，ベラルーシ，ロシア，ウクライナの3ヵ国5診断センターにおいて，共通の医療機材の導入と診断基準の標準統一化を指導し，学校検診を中心に，事故前に生まれていた0〜10歳の放射線感受性が高いと予想された当時の児童・学童を対象として，16万人も巡回検診したのがチェルノブイリ笹川プロジェクトであった(**第 V-1 図**)。人道的支援に基づき，広島，長崎での原爆被災の健康調査に関するノウハウを活かしたものであり，最終的に統計解析に利用できたデータ12万人分が公表され，チェルノブイリ周辺の学校検診のデータを詳細にまとめている[10]。ここでは，その後5年間でどのような甲状腺問題が明らかにされたかの最新の知見を中心に概説する。

(1) 5診断センターの活動成績報告

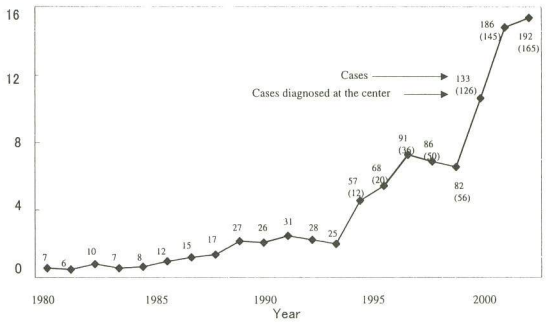
ベラルーシ共和国では，モギュロフ州立診断センターとゴメリ州立特別診断センターの2ヶ所での検診活動が継続されているが，モギュロフでは主に成人検診に診療体制が変更され，甲状腺がんの経年的な頻度の増加が成人でも確認されている(**第 V-2 図**)。現在ではベラルーシ国内で最も成人の甲状腺がんの発見頻度が高く，将来にわたりきめ細かい検診継続と追跡調査が望まれている。

一方，最も放射性降下物による土壌汚染が強く，小児甲状腺がん患者が多く発見されているゴメリ診断センターでは，第 V-1 表に示すすべての新チェルノブイリ笹川プロジェクトに密接に関与している。現在解析中の甲状腺被ばく線量再評価国際プロジェクトや，1,200例に及ぶ詳細な小児甲状腺がん症例・対照調査研究の結果などは後日公表される予定である。今回最大の調査研究成果は，同じ検診体制にて，学校ベースで行われた約21,000名に及ぶ事故前後に生まれた子供たちの甲状腺異常の比較調査結果である。人種や遺伝的な背景が同様な条件で，同じ生活環境下で成長した子供たちの間で，明らかに事故前に生まれた当時0〜3歳の子供たちに，事故後生まれた子供たちに比較し有意に甲状腺結節，とりわけ甲状腺がんが多く発見された新事実は，短半減期放射性降下物の影響を強く示唆する結果である[11]。すでに本地域では，小児甲状腺がん(15歳未満発見手術例)がピークを過ぎ，その増加年齢層が青年から成人へと移行している事実も，直接の影響因子が現在継続している ^{137}Cs などを中心とする環境汚染問題ではなく，当時の短半減期の放射性降下物であることを強く示唆している。すでにウクライナでの調査結果では，放射性ヨード類の起因性が線量依存性に強調されているが[12,13]，我々は現在，オブニンスク放射線医学研究所と共同で小児甲状腺がんの放射線ヨードによる起因性を解析中であるが，明確な線量依存性の発がん効果は見出していない。

ロシアでは唯一クリンシー市にあるブリヤンスク州立第二診断センターが，改組後も継続して小児甲状腺検診を毎年行い，すでに1996年から2000年末までに総計約42,000人の検診成果を報告している。その結果，11例の甲状腺がん



第 V-1 図 チェルノブイリ周辺地図
^{137}Cs(半減期30年)の土壌汚染地図とチェルノブイリ笹川プロジェクトでの活動拠点(ベラルーシ共和国：モギュロフ，ゴメリ；ロシア：クリンシー；ウクライナ共和国：コロステン，キエフ)



第 V-2 図　ベラルーシ共和国における成人甲状腺がんの年次別手術症例数の変移とモギュロフ診断センター(人口10万人あたり)での甲状腺がん発見数

を発見手術しているが，1例が事故後1987年生まれであった以外，全例事故直前1981から1985年生まれであった。

ウクライナ共和国においては，ジトミール州北部一帯の確定診断を担っている州立コロステン診断センターにおいて，紹介患者を中心とした甲状腺診断が主に成人を中心に行われている。母集団がすでに各地区からの紹介患者というバイアスがあり，正確な疫学統計処理はできないものの，1999年に行われた学校検診約5,000名の結果では，年齢とともに甲状腺異常者の頻度は増加している。事故直後1986年に生まれた2例の小児甲状腺がんが報告されているが，チェルノブイリとの因果関係は不明である。

最後にキエフ州立診断センターは，この5年間，外部からの財政的な医療支援を受けず自国の予算と保健体制の中で診断業務を継続している。ほとんどが州内からの紹介患者の受入れ検査であり，データそのものから各種甲状腺異常の頻度を解析できない。しかし，甲状腺腫大やヨード欠乏状況は5年前と変化はなく，遅々として改善されない保健医療分野の国情が推察されている。

以上5センターの活動実績は，正確な疫学調査の基盤となるばかりではなく，他のデータとの比較解析などにより新知見を生み出している。例えば，小児甲状腺疾患の甲状腺自己抗体[14]や潜在性甲状腺機能低下症[15]の頻度解析などである。今後，放射線被ばくとこれら良性甲状腺疾患との因果関係の解明が長期追跡調査により明らかにされる必要がある。

(2)　各国からの甲状腺異常の現状報告

当事国3ヵ国からの甲状腺研究第一人者らによる報告では，この5年間でも小児甲状腺がんの増加は，その年齢が上がる傾向以外大きな変化はなく，放射線被ばくによる晩発性甲状腺がんの生涯リスクの延長線上にあると考えられる[16]。ここでも事故後生まれた子供の甲状腺がんは極めて少なく，チェルノブイリ原発事故後の短半減期放射性降下物の甲状腺への影響が強く示唆されている。ベラルーシ全体での国家がん登録から得られた事故前後の甲状腺がんの手術症例数では，特に18歳以下の年齢での事故後の劇的な手術症例数の増加が特徴である(**第 V-2 表**)。一方，経年的な小児甲状腺がん(15歳未満)の発症グラフでは，1997年以降そのピークが青年期へ移行している。2000年までにミンスク甲状腺がんセンターで手術された患者の事故当時の年齢分布では，その半数が被ばく時年齢5歳以下であった。ロシアでは，甲状腺がん以外の良性甲状腺疾患に対する放射線被ばく問題を一般住民や除染作業者などで個別にリスク評価しているが，最終結論は未だ出されていないので，今後も継続解析される必要がある[17]。

ウクライナの場合は，小児甲状腺がんの頻度や発生傾向がベラルーシと酷似しているため，単に数の問題だけではなく，ヨード欠乏や遺伝的背景など質的な解析が行われようとしている[18]。これら交絡因子の関与についても国際共同プロジェクトが展開されている。

いずれにしても，母集団，診断精度，解析方法の標準化，放射線被ばく線量の評価などの問題点を改善しながら，疫学的解析へ供することができる現場レベルでの個々のデータの品質管理がこれからの課題である。この点では，我が国の放射線影響研究所が長年培ってきた広島，長崎の原爆被爆者を対象とした各種疫学調査が，本分野における世界の教科書的な役割を担っている。

3. 新チェルノブイリ笹川プロジェクト

国際機関との連携および総合調整の中で，チェルノブイリ原発事故後傍証的に因果関係が推測されている疾患が唯一甲状腺障害であることが強調され，現在なお米国やヨーロッパの各国がいくつかの健康影響調査を行っている。その中でも現場中心の医療支援に加え，研究協力体制の基盤整備面においても笹川記念保健協力財団の貢献は群を抜いている。特にヨーロッパ共同体，米国国立がん研究所，WHOとの共同プロジェクトとしてスタートしたチェルノブイリ周辺での甲状腺がん手術組織の保管，遺伝子抽出，データ管理を主としたChernobyl Thyroid Tissue Bankは，ミンスク甲状腺がんセンター，キエフ内分泌代謝研究所，オブニンスク放射線医学研究所の3ヶ所に設立され，財団の活動実績の上に各国保健省と共同運用されている。事務局はケンブリッジ大学で，世界中の研究者はインターネット上の申請手続きに従い，外部評価を受け科学部会が必要な甲状腺組織由来，あるいは血液由来の遺伝子を無料で供給する体制が稼動し始めている[19]。これらの情報は

第 V-2 表　ベラルーシ共和国国家がん登録によるチェルノブイリ原発事故前後の小児甲状腺がんと成人甲状腺がんの手術症例数

年代区分	症例数	(男)	(女)	0～18歳	19歳以上
1977～1985	1,472	303	1,169	29	1,443
1986～2000	7,298	1,403	5,895	940	6,353
統 計	8,770	1,706	7,064	974	7,796

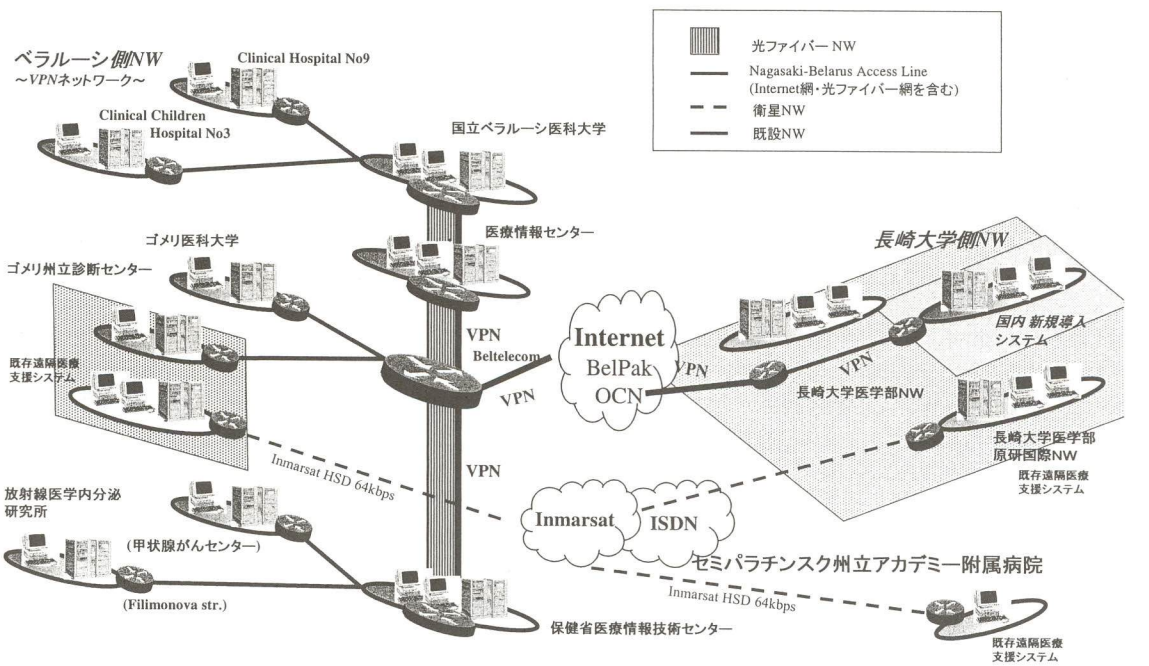
(ミンスク甲状腺がんセンター2001年)

http://www.srl.cam.ac.uk/nistb でアクセス可能である。

21世紀のゲノム医療の時代，すべてのヒト遺伝情報が公開され遺伝子解析が可能となってくると，放射線による細胞，染色体，遺伝子の各レベルにおける研究成果も格段の進歩を遂げてくる。この5年間で分子生物学や遺伝子工学の進歩により，放射線誘発甲状腺がんのメカニズムの解明が進み[20,21]，とりわけチェルノブイリ周辺の小児甲状腺がんには，高頻度に染色体10番目のret/PTC遺伝子再配列がみられることが証明されている[22,23]。今後，さらに詳細な放射線による障害を確認できる刻印遺伝子の存在発見や，その発がん分子機構が明らかになれば，時代を振り返り，真に放射線被ばくにより発症した病気か否かの同定にこれらBankの生体試料が活用されると期待される。人類史上最悪の発電所事故が引き起こした史上初めての小児甲状腺がんの短期間内における激増という未曾有の出来事の中で，一般住民それも放射線感受性の高い乳幼児期被ばくが生涯にわたり彼らのがん発症リスクを押し上げている。この遺伝子損傷の有無を明らかにすることも貴重な生体材料の保管，管理運営を行うChernobyl Thyroid Tissue Bankの役割でもある。

一方，長期にわたり放射能汚染が続くチェルノブイリ周辺地域は大都会から遠く，医療面では遠隔辺境の地域に相当する。優秀な医療スタッフの離職問題に加え，継続した住民の追跡健康調査の難しさが年々露呈している。その中で，適切な診断とアドバイスさらに診断技術の向上の目的で，遠隔医療・医学教育支援のWHO-SMHF Telematics共同プロジェクトが2000年から具体的にベラルーシ共和国ミンスク市でスタートしている。デジタル化された各種画像（超音波診断，顕微鏡など）が通信回線を介して各機関をネットワーク化されるものである。すでに現地ゴメリ診断センターと長崎大学医学部の間では，週1回のペースで画像やコメントが送受信され，2年間で約500例近い甲状腺疾患の診断に貢献し，甲状腺がんの早期発見，早期治療が行われている[24]。今後，ゴメリとミンスクの間で遠隔診断支援システムが構築され，一つのモデルケースとしてIT革命の放射線被ばく医療への貢献とその拡がりが期待されている（**第V-3図**）。

以上の現地活動状況において，今までは日本からのチェルノブイリ医療協力の主導性が堅持されてきた。これはまぎれもなくチェルノブイリ笹川プロジェクトが果たしたこの10年間の活動支援のお蔭であるが，それも2001年5月末のモスクワ国際会議をもち，その大部分は終了した。現在，品質管理がなされ医学データの疫学統計処理に耐えう



第V-3図　WHO-SMHF遠隔医療診断支援・医学教育支援システムの構成図
2000年から具体的に開始されたベラルーシ政府保健省との国際開発共同プログラムは，現在ミンスク市内の情報インフラネットワークの整備と国立ベラルーシ医科大学のソフト関連開発中である。ロシア語環境での医療診断ならびに医学教育のセンターとして，将来はチェルノブイリ全体から他の放射線被ばく地域との連携が企画されている。細胞診や病理診断などの顕微鏡デジタル画像の送受信や超音波診断画像を用いた診断支援と医学教育がすでにゴメリ診断センターと長崎大学医学部で行われている。

る現場医療活動は皆無に近い。本音と建前の使い分けと帳尻合わせの体質が見え隠れする医療現場では，米国政府やヨーロッパ各機関の疫学調査も試行錯誤の連続である。

ソ連邦崩壊後も引き続き垣間見られる旧態依然とした保健医療制度と医学教育は，いくつかの重要な懸案事項を引きずっている。さらに被害者意識が蔓延し，すべからくチェルノブイリ原発事故の所為とする補償問題などが絡む現地の医療事情は，科学的根拠に基づく的確な判断と深謀な政治的配慮が強く望まれている。自国民の健康問題を諸外国の支援に頼らざるを得ない国情そのものが根本的な問題ではあるものの，事故から15年，今こそ唯一の被爆国日本からの本格的な被ばく者医療問題への総合的な取組みが望まれる。

本章では，甲状腺疾患のみの健康影響を日本からの主導性あるプロジェクトから俯瞰したが，その理由の一つは，他の健康影響の有無を評価できる信頼できる疫学統計データがないのが実情だからである。国連科学委員会UNSCARE 2000の報告でも，チェルノブイリ問題での信頼できるデータが乏しいのは上記理由によるものである[25]。さらに2001年6月末でのPub Medインターネット医学文献検索(http://www.ncbi.nlm.nih.gov/PubMed/)では，「チェルノブイリ」の項で約2,300の文献にアクセスできる。最近ではロシア語論文数も増えているが，現地科学者のデータを検証する，あるいは共同研究を推進する資金と人材の投入なくしては，いたずらに風化の道を歩むだけで，真の意味での「20世紀の負の遺産の精算と活用」にはならないと危惧される。

4．他の健康影響調査報告

甲状腺以外では，血液疾患についても検討が加えられているが，一般住民への明らかな白血病などの血液異常と放射線被ばくの因果関係は証明されていない。ただし，事故直後に大量被ばくをしたプリピヤチ市の子供たちや[26,27]，除染作業者の集団の中には有意に白血病が増加したとの報告もあり，真偽の確認が必要である[28]。その他のがんの発生増加に関する可科学的なデータはない。しかし，精神的ダメージによる各種障害については解析方法の困難さも加わり，今後の解明を待たなければならない[29]。

5．原爆と原発事故の健康影響の違い

広島，長崎原爆被災による住民の放射線影響は主に外部被ばくという直接被ばくであり，その被ばく線量に応じて各種悪性腫瘍の発生リスクが増加している[30]。一方，チェルノブイリ周辺の一般住民への健康影響は，直接的な外部被ばくは皆無に近い，あるいは無視できる程度の土壌汚染からの微量慢性被ばくであるが，事故直後に大量放出された希ガス類に含まれる短半減期の各種放射性同位元素，とりわけ放射性ヨード類の環境汚染さらに食物連鎖による体内吸収後の内部被ばくが甲状腺へ大きな影響を与えたと考えられる。すでに述べてきたが，チェルノブイリでは，事故当時の乳幼児に集中して甲状腺がんの激増が確認された。しかし，隣国のポーランドでは，事故直後の無機ヨード剤投与による甲状腺ブロック[a]という政府介入により，小児甲状腺がんの発症は皆無である。我が国でも予期せぬ原発事故の際に，放射線ヨード類による甲状腺内部被ばく軽減あるいはブロックの具体的対応策が講じられようとしている。放射線被ばくによる健康障害をすべて網羅することはできないが，被ばく線量の過小や線質の違い，被ばく様式の違い，さらに被ばく時年齢，感受性の違い，臓器・細胞の違いなどからも，総合的にチェルノブイリの健康影響を捉え，ハイリスクグループの徹底した長期フォローが必要である。

6．おわりに

チェルノブイリ原発事故から15年。そのうち10年間，現場に足を運ぶこと50回以上に渡り，冬季40日間の検診業務や遠隔医療の立上げなど，貴重な経験をさせて頂いた。モスクワでのチェルノブイリ笹川国際会議で，参加者が合意して「21世紀へのメッセージ」として発表採択されたモスクワ笹川宣言を下記に掲げて，10年間のまとめと今後の提言とさせて頂くが，これからが本格的な晩発性放射線障害の分子疫学調査と科学的解析の幕開けと考えられる。

『1986年4月26日に起きたチェルノブイリ原子力発電所事故は，一つの国の事故であっても容易に国境を越え，近隣諸国だけではなく遠い離れた地域まで放射能汚染を拡大させること，そして原子力発電の安全性全般にかかわる問題の重要性をすべての人々の脳裏に深く刻み込み，今後も世界を震撼させた出来事として記憶に残るであろう。

このチェルノブイリ原発事故の長期にわたる問題の一つは，直接被ばくをしたいくつかの異なる集団，とりわけ緊急時の労働者と放射能汚染地域に在住する一般住民への種々の健康影響に関する不安である。特に，周辺住民，とりわけ小児や青年に激増した甲状腺がんは生涯その発症リスクが継続する。

さて我々は新しい世紀に足を踏み入れた。「持続可能な健全な地球環境開発」という新しい概念の導入と，「人権保護と環境保全」という観点から，放射線関連と非関連の晩発性健康障害を更に明らかにし，将来の社会保健のあり方に対してこれらの評価と理解をうる為に，原発事故の影響を総括する必要がある。

---

[a] 甲状腺は，普段は無機ヨードを原料にホルモンを合成している。そのため放射性ヨードが体内に入ると無機ヨードと同じ体内挙動をとり，特異的に甲状腺に集積する。そこであらかじめ過剰の無機ヨードを体内に摂取しておくと，後から体内に入る放射性ヨードはヨード飽和状態の甲状腺には取り込まれず，被ばくを軽減あるいは阻止することができる。このようなあらかじめの無機ヨード措置のことを甲状腺ブロックといい，放射性ヨードの甲状腺内取込みを阻害することを意味する。

ここにベラルーシ，ロシア，ウクライナにおいて各種健康影響の診断と治療，さらに関連研究の為に，統一プロトコールを用いて集められたチェルノブイリ笹川プロジェクトのデータは，21世紀の更なる調査研究の基盤となるものであろう。

以上から，チェルノブイリ原発事故による放射線被ばく者への長期にわたるフォローアップ体制の維持運営に向けた努力と，現場志向型の放射線被ばく者医療研究への支援，ならびに子供たちへの保健医療の改善へ向けた努力への参加を，国際社会に呼びかけるものである。』

（なお，以上の国際会議の内容と関連研究の成果は2002年早々にはElsevier Science, Amsterdamから"International Congress Series 1234"として出版予定である。）　（山下俊一）

——参考文献——

1) V.S. Kazakov, E.P. Demidchik, L.N. Astakhova, "Thyroid cancer after Chernobyl", *Nature*, **359**〔6390〕, 21 (1992).
2) K. Baverstock, B. Egloff, A. Pinchera, C. Ruchti, D. Williams, "Thyroid cancer after Chernobyl", *Nature*, **359**〔6390〕, 21～22 (1992).
3) Health consequences of the Chernobyl accident, Scientific Report World Health Organization, Geneva, (1996).
4) A. Karaoglou, G. Desmet, G.N. Kelly, H.G. Menzel (eds.), "The radiological consequences of the Chernobyl accident", *European Commission and the Belarus, Russian and Ukrainian Ministries on Chernobyl Affairs, Emergency Situations and Health, Proc. First Int. Conf.*, Minsk, Belarus, 18～22 March, 1996, (1996).
5) *One Decade After Chernobyl; summing up the consequences of the accident, Proc. of Int. Conf.*, Vienna, 8～12 April, 1996, (1996).
6) V.K. Ivanov, A.I. Gorsky, A.F. Tsyb, M.A. Maksyutov, E.M. Rastopchin, "Dynamics of thyroid cancer incidence in Russia following the Chernobyl accident", *J. Radiol. Prot.*, **19**〔4〕, 291～292 (1999).
7) L.N. Astakhova, L.R. Anspaugh, G.W. Beebe, A. Bouville, V.V. Drozdovitch, V. Garber, Y.I. Gavrilin, V.T. Khrouch, A.V. Kuvshinnikov, Y.N. Kuzmenkov, V.P. Minenko, K.V. Moschik, A.S. Nalivko, J. Robbins, E.V. Shemiakina, S. Shinkarev, S.I. Tochitskaya, M.A. Waclawiw, "Chernobyl-related thyroid cancer in children of Belarus: a case-control study", *Radiat. Res.*, **150**〔3〕, 349～356 (1998).
8) J.P. Bleuer, Y.I. Averkin, T. Abelin, "Chernobyl-relate thyroid cancer: what evidence for role of short-lived iodines?", *Environ. Health Perspect*, **105**〔6〕, 1483～1486 (1997).
9) S. Nagataki, K. Ashizawa, S. Yamashita, "Cause of childhood cancer after Chernobyl accident", *Thyroid*, **8**〔2〕, 115～117 (1998).
10) S. Yamashita, S. Shibata (eds.), *Chernobyl: A decade. Elvesier Excerpta Medica*, Amsterdom 1156, p.1～613 (1997).
11) Y. Shibata, S. Yamashita, V.B. Masyakin, S. Nagataki, *Fifteen Years after the Chernobyl Accident: Novel Evidence of Post-Chernobyl Thyroid Cancer*, Lancet in press, (2001).
12) G.M. Goulko, N.I. Chepurny, P. Jacob, I.A. Kairo, I.A. Likhtarev, G. Prohl, B.G. Sobolev, "Thyroid dose and thyroid cancer incidence after the Chernobyl accident: assessments for the Zhytomyr region (Ukraine)", *Radiat. Environ. Biophys.*, **36**〔4〕, 261～273 (1998).
13) P. Jacob, G. Goulko, W.F. Heidenreich, I. Likhtarev, I. Kairo, N.D. Tronko, T.I. Bogdanova, J. Kenigsberg, E. Buglova, V. Drozdovitch, A. Golovneva, E.P. Demidchik, M Balonov, I. Zvonova V. Beral, "Thyroid cancer risk to children calculated", *Nature*, **392**〔6671〕, 31～32 (1998).
14) F. Pacini, T. Vorontsova, E. Molinaro, E. Kuchinskaya, L. Agate, E. Shavrova, L. Astachova, L. Chiovato, A. Pinchera, "Prevalence of thyroid autoantibodies in children and adolescents from Belarus exposed to the Chernobyl radioactive fallout", *Lancet*, **352**〔9130〕, 763～766 (1998).
15) J.R. Goldsmith, C.M. Grossman, W.E. Morton, R.H. Nussbaum, E.A. Kordysh, M.R. Quastel, R.B. Sobel, F.D. Nussbaum, "Juvenile hypothyroidism among two populations exposed to radioiodine", *Environ. Health Perspect*, **107**〔4〕, 303～308 (1999).
16) P. Jacob, Y. Kenigsberg, I. Zvonova, G. Goulko, E. Buglova, W.F. Heidenreich, A. Golovneva, A.A. Bratilova, V. Drozdovitch, J. Kruk, G.T. Pochtennaja, M. Balonov, E.P. Demidchik, H.G. Paretzke, "Childhood exposure due to the Chernobyl accident and thyroid cancer risk in contaminated areas of Belarus and Russia", *Br. J. Cancer*, **80**〔9〕, 1461～1469 (1999).
17) V.K. Ivanov, M.A. Maksioutov, S.Yu Chekin, Z.G. Kruglova, A.V. Petrov, A.F. Tsyb, "Radiation-epidemiological analysis of incidence of non-cancer disease among the Chernobyl liquidators", *Health Phys.*, **78**〔5〕, 495～501 (2000).
18) M.D. Tronko, T.I. Bogdanova, I.V. Komissarenko, O.V. Epstein, V. Oliynyk, A. Kovalenko, I.A. Likhtarev, I. Kairo, S. B. Peters, V.A. LiVolsi, "Thyroid carcinoma in children and adolescents in Ukraine after the Chernobyl nuclear accident: statistical data and clinicomorphologic characteristics", *Cancer*, **86**〔1〕, 149～156 (1999).
19) G.A. Thomas, E.D. Williams, D.V. Becker, T.I. Bogdanova, E.P. Demidchik, E. Lushnikov, S. Nagataki, V. Ostapenko, A. Pinchera, G. Souchkevitch, M.D. Tronko, A.F. Tsyb, M. Tuttle, S. Yamashita, "Thyroid tumor banks", *Science*, **289**〔5488〕, 2283 (2000).
20) A. Sarasin, A. Bounacer, F. Lepage, M. Schlumberger, H.G. Suarez, "Mechanisms of mutagenesis in mammalian cells; Application to human thyroid tumours", *C.R. Acad. Sci. Ser. 3*, **322**〔2～3〕, 143～149 (1999).
21) N. Mitsutake, H. Namba, S.S. Shklyaev, T. Tsukazaki, A. Ohtsuru, M. Ohba, T. Kuroki, H. Ayabe, S. Yamashita, "PKC delta mediates ionizing radiation-induced activation of c-Jun NH2-terminal kinase through MKK7 in human thyroid cells", *Oncogene*, **20**〔8〕, 989～996 (2001).
22) M.N. Nikiforova, J.R. Stringer, R. Blough, M. Medvedovic, J.A. Fagin, Y.E. Nikiforov, "Proximity of chromosomal loci that participate in radiation-induced rearrangements in human cells", *Science*, **290**〔5489〕, 62～63 (2000).
23) H.M. Rabes, "Gene rearrangements in radiation-induced thyroid carcinogenesis", *Med. Pediatr. Oncol.*, **36**〔5〕, 574～582 (2001).
24) S. Yamashita, Y. Shibata, N. Takamura, K. Ashizawa, N.

Sera, K. Eguchi, "Satellite communication and medical assistance for thyroid disease diagnosis from Nagasaki to Chernobyl", *Thyroid*, **9**〔9〕, 969 (1999).
25) *Source and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2000 Report to General Assembly, with Scientific Annexes Volume II*, Unite Nation, New York, (2000).
26) D.F. Gluzman, I.V. Abramenko, L.M. Sklyarenko, V.A. Nadgornaya, M.P. Zavelevich, N.I. Bilous, L.Y. Poludnenko, "Acute leukemias in children from the city of Kiev and Kiev region after the Chernobyl NPP catastrophe", *Pediatr. Hematol. Oncol.*, **16**〔4〕, 355～360 (1999).
27) A. Noshchenko, K. Moysich, A. Bondar P. Zamostyan, V. Drosdova, A. Michalek, "Patterns of acute leukaemia occurrence among children in the Chernobyl region", *Int. J. Epidemiol.*, **30**〔1〕, 125～129 (2001).
28) A.P. Konogorov, V.K. Ivanov, S.Y. Chekin, S.E. Khait, "A case-control analysis of leukemia in accident emergency workers of Chernobyl", *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.*, **19**〔1～2〕, 143～151 (2000).
29) K.N. Loganovsky, T.K. Loganovskaja, "Schizophrenia spectrum disorders in persons exposed to ionizing radiation as a result of the Chernobyl accident", *Schizophr. Bull.*, **26**〔4〕, 751～773 (2000).
30) *UNSCARE 2000 Report to the General Assembly, Volume II: Effects*, United Nations, New York, (2000).

VI. 事故後の環境影響

東京大学原子力研究総合センター　杉浦紳之

1. はじめに

チェルノブイリ原子力発電所事故により大量の放射性物質が環境中に放出され，広大な地域の環境汚染をもたらした。汚染地域はロシア，ウクライナ，ベラルーシの事故当時のソ連邦内のみならずヨーロッパ地域に及んだ。さらに，日本や米国などでもチェルノブイリ由来の放射性核種が事故数日後に環境モニタリングにより検出されるなど，その影響は北半球全域に及んだ。

環境中への放射性物質の放出量の推定や汚染範囲の評価は事故直後から進められ，事故約4ヵ月後の1986年8月にウィーンで開催された「IAEA事故後検討会合」において旧ソ連邦の科学者によりはじめてまとまった報告として行われ，その概要はIAEA国際原子力安全諮問グループの概要報告としてまとめられた[1]。環境サーベイデータの積み重ねや事故時の炉心インベントリー評価の見直しは引き続き行われ，事故後10年を区切りに，1995年末にOECD/NEAが「チェルノブイリから10年—放射線・健康影響」[2]と題する報告書を刊行し，1996年4月にIAEAが「チェルノブイリ後10年—事故影響のまとめ」[3]についての国際会合を行い，環境汚染の状況や影響・評価に関する知見についてほぼ一応の結論がまとめられたものと考えられる。その後，UNSCEAR 1998年報告[4]においてチェルノブイリ事故の環境影響について健康影響とともに包括的な報告が行われた。最新の報告としてはUNSCEAR 2000年報告[5]があり，本章では，UNSCEAR 2000年報告を中心に適宜それ以前の報告内容を含めて述べることとする。

2. 環境中への放射性物質の放出

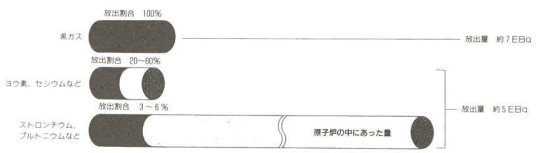
(1) 放出された放射性物質の種類と量

環境中に放出された放射性物質の量は，事故時の炉心の燃焼度から評価されたインベントリー(放射性核種の種類と量)ならびに環境における空気中濃度や地表の汚染密度の実測の両面から推定された[5]。

環境中に放出された放射性物質の量は，希ガス(キセノン(Xe)，クリプトン(Kr))が約7EBq，希ガス以外の放射性物質が約5EBqと見積もられている[2,3]。炉心インベントリーに対する割合は，希ガスが100%，ヨウ素(I)・セシウム(Cs)などの揮発性物質が20～60%，ストロンチウム(Sr)が4～6%，プルトニウム(Pu)などの燃料物質は3.5%とされている(**第VI-1図**)。UNSCEAR 2000年報告では，^{137}Csの放出量は85 PBq(炉心インベントリーの30%)，^{131}Iの放出量は1,760 PBq(炉心インベントリーの50%)と報告されている[5]。**第VI-1表**に事故により環境中に放出された放射性核種の種類と量をいくつかの評価についてまとめて示す。

事故直後の報告[1]では，総放出量が1～2EBq(希ガスを含まず)，内訳として，希ガスが100%，I・Csなどの揮発性物質が20～30%，燃料物質は3±1.5%と推定されており，増大の方向に訂正された。放出量に関して数字の訂正が行われた理由として，当初のチェルノブイリ事故のインベントリーの推定は，航空機サーベイによる大気のサンプリングと旧ソ連領土内の放射性物質の地表への沈着データに基づいており，旧ソ連領土以外に運ばれた放射性物質が考慮されていなかったことや，放射能の減衰補正の基準日に事故当日の4月26日と大規模な放出が終了した5月6日の両方が用いられていたことが挙げられる。しかしながら，この放出量増大の訂正は個人の被ばく線量の増加をそのまま示すものではない。

環境放射線影響上注目すべき主な放射性物質は，Cs, I, Sr, Puの4つと考えられる。CsとIは揮発性物質であり，放出割合も高かった。^{131}Iは物理学的半減期が8日と短いために事故直後の被ばく線量への寄与が大きく，^{137}Csは物理学的半減期が30年と長いため長期にわたる被ばくが問題となる。揮発性の低い元素は燃料粒子に付着して放出され，ホットパーティクルとなった。Sr, Puはホットパーティクルとなり，主に原子炉近傍に沈着していたが，事故後15年を経過した現在では風化・変性による溶出が進んでおり，その挙動に注目する必要がある。さらに，^{241}Puの崩壊により生じる^{241}Amの蓄積も進んでおり，^{241}Amは^{241}Puに比べて環境における化学形に不明な点が多く，反応性にも富んでいることから，その環境における状態や挙動に関する検討が今後の課題の1つである。



第 VI-1 図 事故時の炉心インベントリーおよび環境に放出された量と割合

第 VI-1 表 チェルノブイリ事故による放射性核種の推定放出量

放射性核種	放出放射能(PBq)		
	1986年評価値[a),1)]	1996年評価値[b),3)]	UNSCEAR 2000年報告で使用された値
希ガス			
^{85}Kr	33	33	
^{133}Xe	1,700	6,500	6,500
揮発性物質			
^{129m}Te		240	
^{132}Te	48	1,000	~1,150
^{131}I	260	1,200~1,700	~1,760
^{133}I		2,500	
^{134}Cs	19	44~48	~54
^{136}Cs		36	
^{137}Cs	38	74~85	~85
中間的物質			
^{89}Sr	80	81	~115
^{90}Sr	8	8	~10
^{103}Ru	120	170	>168
^{106}Ru	63	30	>73
^{140}Ba	170	170	240
不揮発性物質(燃料物質を含む)			
^{95}Zr	130	170	196
^{99}Mo	96	210	>168
^{141}Ce	38	200	196
^{144}Ce	96	140	~116
^{239}Np	4.2	1,700	945
^{238}Pu	0.03	0.03	0.035
^{239}Pu	0.024	0.03	0.03
^{240}Pu	0.03	0.044	0.042
^{241}Pu	5.1	5.9	~6
^{242}Pu	0.00007	0.00009	
^{242}Cm	0.78	0.93	~0.9
合 計 (希ガスを除く)	1,000~2,000	8,000	5,300

a) 1986年5月6日に減衰補正した値
b) 1986年4月26日に減衰補正した値

(2) 放出パターン

事故発生後10日間にわたり，放射性物質の環境中への大量放出は続いた。環境中に放出された放射性物質の量の日変化(希ガスを除く)を**第 VI-2 図**に示す。

事故当日(4月26日)の放出は，爆発の際に燃料が機械的に破壊されたことにより，希ガスやI, Csの一部など，揮発性の高い放射性核種が放出された。事故後2日目から6日目までは，消火のために投下された約5,000tのホウ素-カーバイド，白雲石，粘土や鉛のために，炉心からの放出が抑制され，1日目の1/6にまで減少したとされている。

事故後7日目から10日目では，残留熱の放出により再び炉心燃料が2,000℃程度まで上昇し，初日の70%にまで放出量が増加した。この期間では，Iを主体とする揮発性物質と使用済燃料に含まれる組成と同様の放射性物質が放出された。

事故後11日目(5月6日)以降，放出量は急激に減少した。これは，炉心デブリが下部遮蔽を溶融し原子炉内の他の物質と反応するのにつれて，燃料が急速に冷却されたことが原因とされている。

3. 陸域への影響

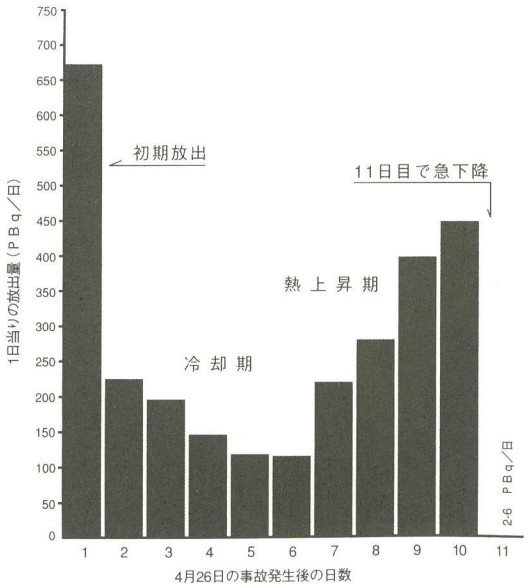
(1) 放出された放射性物質の降下

事故発生時は，チェルノブイリ原子力発電所周辺の地上付近における風は弱かったものの，1,500m上空では南東から毎秒8~10mの風が吹いており，事故により舞い上がった放射性物質のうちの約60%は1,200~1,800m上空に達し，この風に乗り，事故翌日の4月27日には，フィンランドやスウェーデンで検出された。

チェルノブイリ事故による汚染が大きかった3地点(スポット)は，①セントラル，②ブリヤンスク・ベラルーシ，③カルーガ・トゥーラ・オリオルと呼ばれている。**第 VI-3 図**に事故後放出が大きかった期間の放射性プリュームの流れを示す。セントラル地点は北西方向(第 VI-3 図の1)と西方向(第 VI-3 図の2)への放出が支配的であった事故初期に汚染された。このうち，最も汚染がひどかったのは原子炉から30km圏内の範囲であり，^{137}Csの地表への沈着は1,500kBq/m^{2}を上回った。ブリヤンスク・ベラルーシ地点は，原子炉の北北東200kmの地点を中心とした区域で，第 VI-3 図の3で示される放射性プリュームにつき4月28~29日にかけて降った雨により汚染された。この地点で最も^{137}Csの汚染が高かった区域は，セントラル地点と同レベルであり，中には5,000kBq/m^{2}に達した村もいくつかあった。ロシアのカルーガ・トゥーラ・オリオル地点は，原子炉の北東約500kmの地点を中心とした区域であり，4月28~29日にかけての降雨によりブリヤンスク・ベラルーシ地点を汚染させたのと同じ放射性プリューム(第 VI-3 図の3)により汚染された。^{137}Csの沈着レベルは先の2地点に比べて低く，600kBq/m^{2}以下のところがほとんどであった。

^{90}Srや Puなどの他の核種は^{137}Csに比べて放出量が少なく，そのほとんどは原子炉近傍に降下した。^{131}Iは放出された量の約66%が，^{137}Csは約44%がロシア，ウクライナ，ベラルーシの旧ソ連邦内に降下した。**第 VI-4 図**に旧ソ連邦ヨーロッパ部における^{137}Csの降下量を示す。

ヨーロッパのほとんどの国では放射性プリュームが通過



第 VI-2 図　チェルノブイリ事故により放出された放射性物質の日変化(希ガスを除く)

した際に，主として^{137}Csと^{134}Csを中心とした数種類の核種の沈着があった。オーストリア，スイス東部・南部，ドイツ南部の一部およびスカンジナビア半島では，放射性プリュームが通過した際に降雨があったために，放射性物質の地表への沈着は，他の国に比べて大きかった。一方，放射性核種の沈着が少なかったのは，スペイン，フランス，ポルトガルである。北半球では，日本や米国などの遠方の地点でも放射能雲が観測されたが，ヨーロッパ以外の国での放射性核種の地表への沈着量は極めて少なかった。なお，南半球では地表への沈着は観測されていない。

（2）　農地への影響

CsとSrは，それぞれカリウム(K)とカルシウム(Ca)の植物にとっての必須元素と同じメカニズムによって植物に取り込まれるため，これらの放射性核種の農作物への移行は重要な問題となる。ロシア，ウクライナ，ベラルーシの旧ソ連邦内の農地で，汚染密度がCsについて37 kBq/m^2，Srについて10 kBq/m^{2}を超えた面積は52,000 km^{2}に達した。

放射性物質の沈着レベルにはかなりのバラツキが認められ，1991年には土壌表面から深さ5 cmまでの^{137}Csの放射能は25～1,000 kBq/m^{2}の範囲にあった[6]。Csの垂直方向の移行速度はそれほど大きくなく，未耕作の土地では土壌の種類によらず農耕深さ(20 cmまで)における存在割合は90%を超える。SrではCsよりも移行速度が少し大きいが，やはり農耕深さにおける存在割合は70～80%と高い。農地を耕すことにより放射性物質は均等に分布し，農作物の根を通じて取り込まれることとなる。したがって，とくに放射性物質の存在割合が高い表土の最上部を耕作前に除去・処分することは有効な除染法の1つであるが，除去した土壌の処分方法に問題が残る(例えば，周辺に積み上げるにしても相当の場所を確保する必要がある)。このため，深さ30～40 cmまで耕して表面の汚染密度の高い土壌を根が届かない深いところに持っていき，表面には深いところにあった汚染密度の低い土壌をもってくるといった深耕という方法がとられ，農作物への移行係数の低減が図られている。

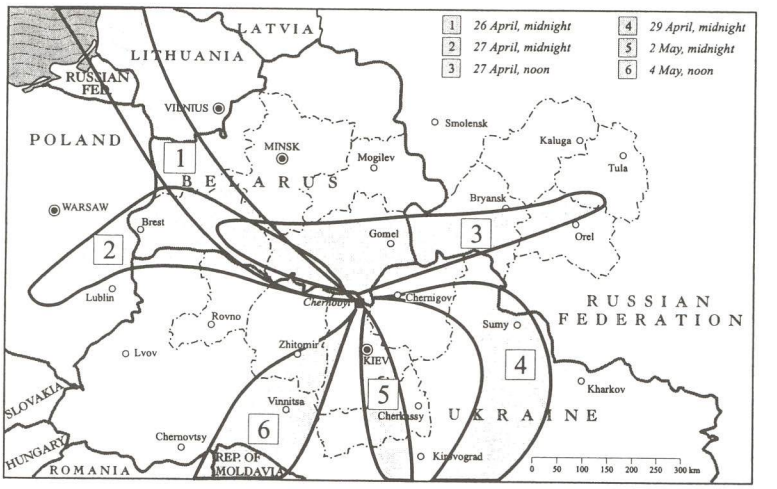
さらに，農作物への移行係数低減のための対策としては，施肥や石灰散布が挙げられる。上述の高汚染地域の1つであるセントラル地域(発電所から西方向の地域)はポレーシアと呼ばれ，ポドゾルというやせた不毛の土壌が広くひろがる地域である。Kの少ないやせた土壌ではCsの移行係数が高くなるため，施肥(カリウム肥料，NPK配合肥料)は有効な手段となる。また，石灰散布によりSrの移行係数の低減と土壌の中性化が図られる。**第 VI-5 図**に農作物への移行係数に係わる実験栽培を行っている実験農場の様子を示す。

（3）　森林への影響

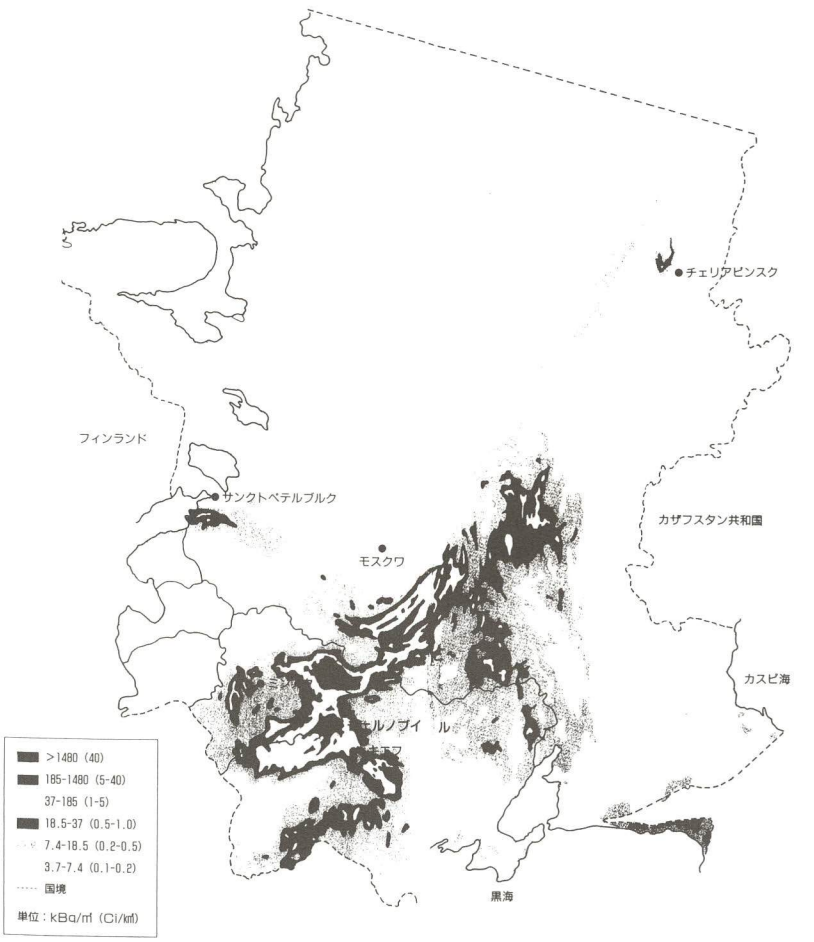
森林は多様な生態系であり，その植物相と動物相は気候はもちろん，土壌の特性や地形などと複雑に関連する。森林はレクレーション活動の場所だけではなく，仕事や食料供給の場ともなっている。野生の猟獣肉や野イチゴ，キノコは，汚染地域の多くの住民の補足的な食料源となるほか，材木と材木製品は経済的な資源である。

森林は非常に優れたフィルタの役目をするため，森林への放射性物質の沈着は，農地より通常大きくなる。森林が汚染された場合，放射性物質の保持作用も高い。森林の表土は有機物を多く含み安定性が高いことから，土壌から植物への放射性核種の移行が増加する結果，多くの場合，地衣やコケ，キノコにおける放射性核種の汚染密度は高くなる。

森林への影響として特筆すべきことは「赤い森」である。「赤い森」は発電所の南部と西部にある特に放射性物質の降下量が多く影響の大きかった場所をいう。「赤い森」は松林であり，木々は100 Gyを超える線量を受けすべてが死滅し，枯れた葉の色から呼び名が付けられた。1987年には，土地の汚染を低減するためだけでなく，森林火災による放射性物質の拡散(再浮遊)も防止するために，汚染が特にひどかった地域(約375 ha)について改善措置が施された。土壌表面から10～15 cmを除去するとともに，死滅した木々を伐採し，これらを深いトレンチの中に入れ，その上から砂がかぶせられた。全体の埋設量は約10万m^{3}に達した。こうした対策により，土壌の放射能汚染は少なくとも1/10に減少したと見積もられている。事故後15年を経過した現在，「赤い森」が埋められた地域には白樺等の木が生長している。根は地中深くに伸びていることから，放射性物質は根から木に移行し葉にも蓄積される。木が広葉樹であ



第 VI-3 図　事故後放出された放射性プリューム(日時は世界標準時)



第 VI-4 図　旧ソ連邦ヨーロッパ部における ^{137}Cs 降下量(1995年)

第 VI-5 図　移行係数測定のための実験農場の様子

第 VI-6 図　「赤い森」の現状

る場合には，落葉に伴い葉に蓄積している放射性物質が拡散することとなり，再浮遊の原因となっている。**第 VI-6 図**に「赤い森」の現状を示す。

4．水系への影響

チェルノブイリ事故による放射性物質の環境への放出は，河川・湖沼等の水系にも少なからず影響をもたらした。放射性物質の水系への流入は，大気中に放出された放射性物質の降下，汚染水の流入等の直接的経路のほか，汚染された地表面からの洗い出し等の 2 次的経路がある。したがって，地域の気象，地質等の条件に依存して，平面的にも時間的にも複雑な汚染分布をしている。

水系に流入した放射性物質は，水系内で速やかに再配分され，時間の経過とともに底質や水棲生物へと移行・蓄積する。これらの放射性物質は，飲料，漁業，灌漑等の水系の利用を介して人の影響に関わることとなる。

（1） チェルノブイリ冷却池[2,7]

冷却池は原子力発電所サイトの南東に位置し，3 つのエリアからなる塩水湖である。面積22 km^2，平均水深6.6 m，水量0.15 km^3，塩素量14～28 mg である。

冷却池は，事故により最も汚染した水系である。水に含まれる放射性物質は，事故直後の1986年 5 月の時点ではほとんどが ^{131}I などの短半減期核種であった。水中放射能濃度は，放射性物質の崩壊と湖沼への沈降・蓄積により，6 月の水中濃度は大幅に減少した。その後，水の汚染は Cs が主体となる。^{137}Cs の平均濃度は，1986年210 Bq/l，1987年60 Bq/l，1988年19 Bq/l，1990年14 Bq/l と年々減少した。^{90}Sr は1986年 8 月の時点で ^{137}Cs の 2～3 %以下であった。

冷却池堆積物の放射能分布は極めて不均一である。1986年 5 月の調査で，底面積全体の27%を占めるシルト質(泥)における放射能濃度が高いことが報告された。最大濃度は 8～10 MBq/kg であった。核種の存在割合は，^{95}Zr-^{95}Nb が54～70%，^{106}Ru が 4 %，^{137}Cs が 2～5 %，^{134}Cs が 1～2 %であった。^{90}Sr は ^{137}Cs の35%であった。1987および1988年には短半減期核種の崩壊により，^{137}Cs が全体の20～60%を占めた。

冷却池の藻類の全放射能濃度は1986年では最大 2～4 MBq/kg-生重量で，核種別の割合は ^{95}Zr-^{95}Nb が35%，^{144}Ce が32%，^{137}Cs が12%，^{134}Cs が 2～5 %，^{90}Sr が 2 %となっている。冷却池に生息する魚類の ^{137}Cs 濃度は，1986年30～180(Bq/kg-生重量)，1987年50～200，1988年40～150，1989年25～82，1990年 8～80と，事故後 2 年目にピークを示し，その後減少した。

（2） ドニエプル水系[2,7,8]

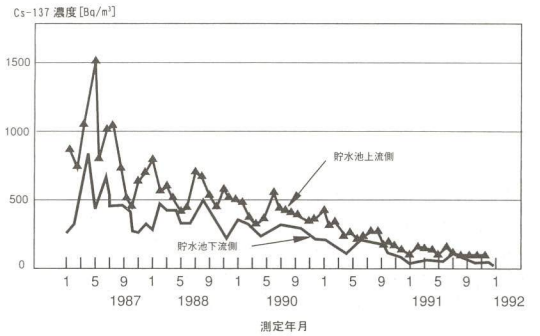
ドニエプル水系は，黒海に至るドニエプル川を中心とし，プリピャチ川等の支流やキエフ貯水池等の流域貯水池を含む。飲料水，漁業，灌漑用水として1,900万人に利用され，特にドニエプロペテロフスクやドナックの工業地帯とウクライナの南地区においては800万人が飲料水として利用し，その量は大人 1 人 1 日約1.5l とされている。また，灌漑用水として，年間約 5 km^3 のドニエプル川の水が160万 ha の農地に利用されている。

事故直後の1986年 5 月初めの時点において，河川水中から ^{132}Te，^{140}Ba，^{140}La，^{99}Mo，^{103}Ru，^{144}Ce，^{141}Ce，^{95}Zr-^{95}Nb，^{137}Cs，^{134}Cs，^{239}Np などの核種が検出された。全放射能量はプリピャチ川で10 kBq/l，ウズ川で 5 kBq/l，ドニエプル川で 4 kBq/l であった。1987年以降のキエフ貯水池上流および下流の ^{137}Cs 濃度の経年変化を**第 VI-7 図**に示す。水中の Cs は時間経過とともに沈降し，川底の泥などと結び付き，年々減少する傾向を示している。

ドニエプル水系では漁業が盛んである。1986年から1990年までの年平均の漁獲量は約25,000 t であり，そのうち1,200 t はキエフ貯水池からのものである。キエフ貯水池における魚の ^{137}Cs 濃度は1987～89年にかけて最大値を示し，その後急激に減少した。また，^{90}Sr では，タイは1986年，スズキ，カマスは遅れて1988年に最大値が見られるなど，魚類によって異なる傾向であった。

（3） 水系汚染防御対策[9]

上述のとおり，キエフ-黒海間のドニエプル川の流域住



第 VI-7 図　キエフ貯水池での^{137}Cs濃度の変化

民は，ドニエプル水系の水を飲料水，灌漑用水，漁業等で利用しており，水系の汚染低減は極めて重要な課題である。水系の放射能濃度は時間の経過とともに減少していったが，水系の上流にあるプリピャチ川周辺には大量の^{137}Csをはじめとする放射性物質が沈着しており，春の融雪，夏の豪雨により洪水で汚染した水がドニエプル水系に流れ込む恐れがある。これまでにも，1987年には春の融雪，1988年には夏の降雨，1991年には氷塊による洪水が発生し放射能濃度の上昇が認められている。

これに対して採られた対策を以下にまとめる。

—事故後 2〜3 ヶ月

①ダム操作システムを用いたキエフ貯水池からの汚染水の流量調節

②地下水使用の増加と汚染した表層水源の使用の低減

③市営水処理工場の飲料水浄化能力の増強と飲料水採取地点の変更

—1986年夏〜1988年

①汚染土壌の除去

②地表面から水系への放射性物質の流入を最小限に抑えるための植林

③運河や溝の掘削

④汚染土壌の流入を防ぐためのプリピャチ川に沿っての防御堤防の建設

⑤放射性物質を固定するための化学薬品の付加

⑥汚染堆積物の浚渫

—1988〜1991年

①汚染地域周辺の河川左岸(東側)の堤防建設：これは，1988年の洪水により^{90}Srによる汚染が発生したためで，氾濫原に堆積する放射性物質の流入を防ぐための対策として行われた。堤防建設は1992年に完了し，1993年夏の洪水においてその有効性が確認された。

5．食品への影響

環境中に放出された放射性物質は，農作物に移行したり，牧草を介して家畜に摂取され，食品を汚染した。

(1)　食品中の放射性ヨウ素(^{131}I)

^{131}Iは，事故 2〜3 日後から汚染された牧草や飼料を食べた乳牛のミルクから検出された。ベラルーシの南部，ウクライナの北部などでは，牛乳 1lあたり40〜400 kBqという高い濃度が報告された[14]。この値は，旧ソ連邦における牛乳中の^{131}Iの対策基準値3.7 kBq/lを10倍から数100倍上回るものである。対策基準値を大きく超えた牛乳は出荷が停止され，放射能を減衰させるため長期間の保存が可能なバターやチーズ等の加工品の原料として使用された。乳牛を放牧せず牛舎内におき，汚染のない保存飼料で飼育する措置により，数日間で牛乳中の^{131}I濃度は対策基準値以下となった[15]。

牛乳以外では，直接^{131}Iが降下・沈着したり，生育が早い葉菜において高い値が検出された。

^{131}Iは半減期が 8 日と短いことから，1986年 6 月以降の食品中の^{131}Iは問題とならないレベルに減衰した[15]。

(2)　食品中の放射性セシウム(^{137}Csおよび^{134}Cs)

事故当初は放射性ヨウ素が重要な核種となったが，これが減少した後は，放射性セシウム(特に^{137}Cs)が長期間にわたり重要核種となった。

牛乳中の放射性セシウム濃度(^{137}Csと^{134}Csの合計)は，1986年には最大濃度で11〜18 kBq/lに達するものがあり，市場に流通した牛乳中のCsの幾何平均濃度は，ベラルーシで43 Bq/l，旧ソ連邦の南西経済区で30 Bq/l，中央経済区で12 Bq/lと報告されている。

(3)　輸入食品中の放射性物質[12]

チェルノブイリ事故後，我が国では厚生省(当時)が食品 1 kgあたりの^{134}Csと^{137}Csの合計値が370 Bq/kg(放射能暫定濃度)以上のものを輸入禁止とし，主としてヨーロッパからの輸入食品の放射能検査を実施した。1991年 4 月までの検査数約56,600件のうち，約0.1%の54件がこの限度を超え，輸入国に返還された。限度を超えた食品の約半数が乾燥物である香辛料，ハーブであった。

6．おわりに

上述したとおり，環境汚染の全般的状況の把握については，事故後15年の現在までに一応の結論が得られたと考えてよい。今後の環境影響研究の視点は，大きく 2 点に分けられるものと考えられる。

1 点目は，環境科学の個々のメカニズムにつきより深く掘り下げていこうとするものであり，燃料物質等のホットパーティクルの状態・挙動の解析や森林内における放射性物質の移行動態といった研究事例が積み重ねられ(例えば，文献13〜17))，科学的知見としての普遍化，他の事例への応用が図られている。

もう 1 点は，汚染地域の農地の除染や農作物への放射性物質の移行係数の低減など，現実に直面する問題に対する復旧対策に資するものである。30 km圏内の立入禁止区域や他の地域においても移住の措置は今なお解除されていな

い。第2の視点については，社会的，経済的な観点も関連する。一貫したレベルの対策を包括的に実施するためには，放射線防護の視点からの介入基準の検討が重要である。

チェルノブイリ事故は2000年の3号炉停止により新たな局面を迎えている。原子炉のデコミッショニング，石棺（シェルター）の改修・改善，放射性廃棄物処分等の具体的実施に向けて精力的な検討が行われている。これらとともに，環境影響問題についても精力的な検討，対策が行われることを期待して本稿を終える。

——参 考 文 献——

1) IAEA, *Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident*, IAEA Safety Series No.75, INSAG-1, (1986).
2) OECD/NEA, *Chernobyl Ten Years on-Radiological and Health Impact*, (1995).
3) IAEA, EC, WHO, *One Decade after Chernobyl. Summing up the Consequences of the Accident*, Proceedings of an International Conference, (1996).
4) United Nations, *Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1998 Report to the General Assembly, with Annexes*, (1998).
5) United Nations, *Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with Annexes*, (2000).
6) B. Salbu, *et al.*, "The Mobility of Cs-137 and Sr-90 in Agricultural Soils in the Ukraine, Belarus and Russia 1991", *Health Phys.*, **67**〔5〕, 518～528 (1994).
7) I. Kryshev, "Radioactive Contamination of Aquatic Ecosystems following the Chernobyl Accident", *J. Environ. Radioactivity*, **27**〔3〕, 207～219 (1995).
8) O.A. Voitsekhovitch, *et al.*, "Cesium-137 and Storontium-90 Contamination of Water Bodies in the Areas Affected by Releases from the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident—An Overview", *J. Environ. Radioactivity*, **23**, 103～122 (1994).
9) I.F. Vovk, *et al.*, "Geological and Hydrogeological Features of the ChAES 30 kilometer Zone and Possibilities for the Deep or Shallow Burial of Radioactive Wastes", OECD Documents "Sarcophagus Safety 94" The State of the Chernobyl, (1994).
10) USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy, "The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and its Consequences", IAEA Expert Meeting, 25-29 August 1986, Vienna (1986).
11) L.A.イリーン，O.A.パブロフスキー，チェルノブイリ事故の旧ソ連における放射線影響の結果と影響緩和のための措置，IAEA機関紙，1987年4号，原子力資料No.215.
12) 出雲義朗，放射線被ばくの社会的影響評価，第24回放医研環境セミナー予稿集，p.6, (1996).
13) V.A. Kashparov, *et al.*, "Formation of Hot Particles during the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident", *Nucl. Technol.*, **114**, 246～253 (1996).
14) V.A. Kashparov, *et al.*, "Kinetics of Fuel Particle Weathering and 90Sr Mobility in the Chernobyl 30-km Exclusion Zone", *Health Phys.*, **76**, 251～259 (1999).
15) 天野 光，他，チェルノブイリ事故周辺環境における長半減期放射性核種の分布と挙動，JAERI-Conf 99-001，クロスオーバー研究シンポジウム「放射性物質の環境移行研究の新たな展開」報告集，1998年11月26～27日，理化学研究所，和光市，(1999).
16) I. Linkov, *et al.*, "Fungi Contaminated by Radionuclides: Critical Review of Approaches to Modeling", *Proc. IRPA-10*, May 14～19, 2000, Hiroshima, Japan, P-4b-255, (2000).
17) S. Yoshida, *et al.*, "Relationship between Radiocesium and Stable Cesium in Plants and Mushurooms Collected from Forest Ecosystems with Different Contamination Levels", *Proc. IRPA-10*, May 14～19, 2000, Hiroshima, Japan, P-11-244, (2000).

Ⅶ. あ と が き

原子力安全委員会 松 原 純 子

失敗や事故を反省し，その教訓に学ぶことは，人間が生きる上で実行してきた不可欠の知恵である。近頃，「失敗に学ぶ」関係の本が書店の店頭を賑わしている。人々が失敗に学ぶことの重要性を，かってなく強く認識するような事故や不首尾が，昨今多発している時代背景もあろう。今回の企画は，人類史上で人間が起こした最大の人為的ミスともいえるチェルノブイリ事故について，事故シナリオの再検討，RMBK炉の現状，事故後の処理，および環境や人への影響等にかかわる諸情報を横断的に眺め，その現実を直視し，われわれが学ぶために，各分野のエキスパートによって非常に有用な論文・報告が提供された。

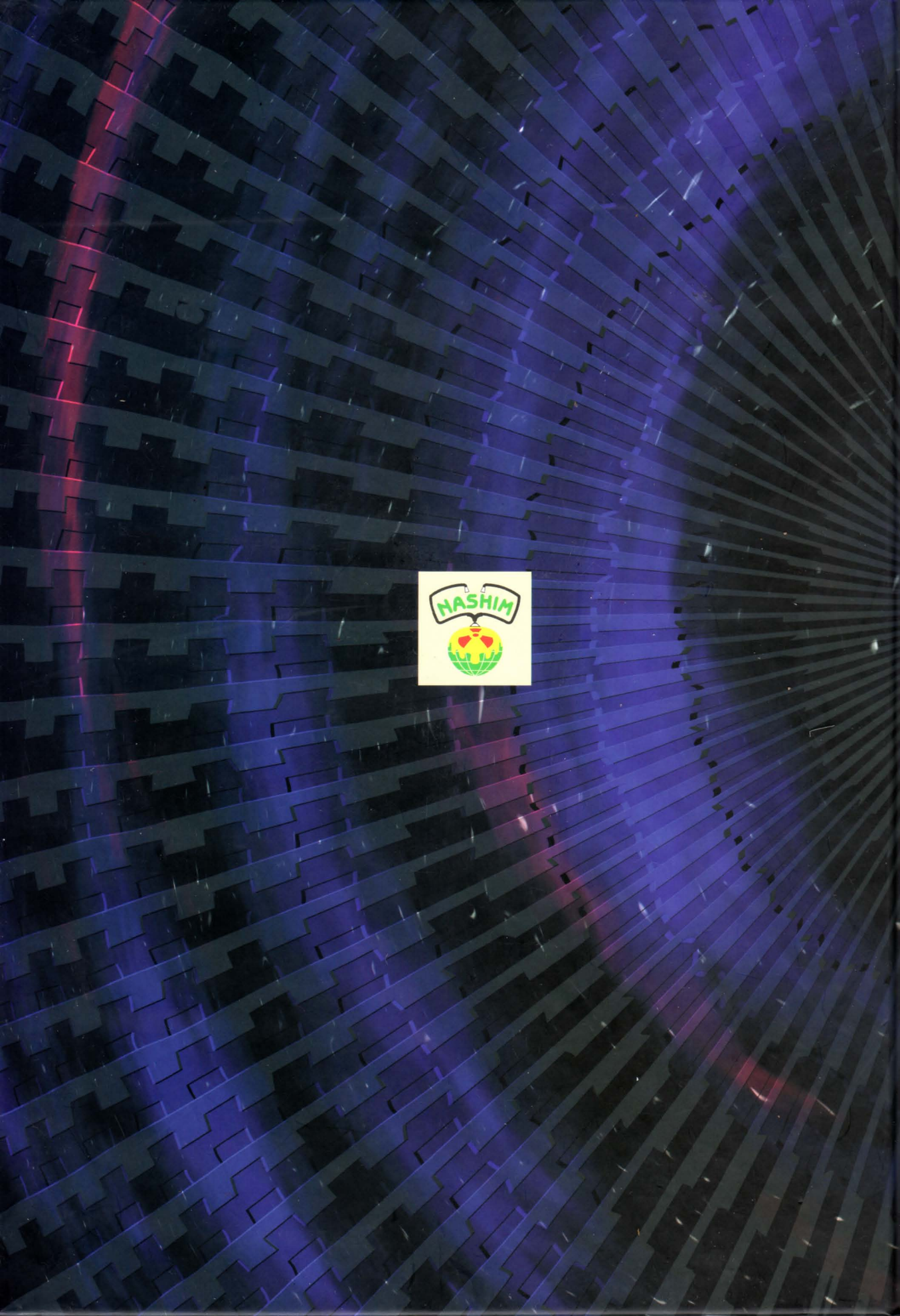
JCOウラン加工工場の事故後約1年を経過した一昨年，原子力安全委員としてチェルノブイリ原子力発電所を視察した。人間が技術的理論に基づいて設計し，運転している施設において，安全確保原則にもとる行動が結果する事実を目の当たりにして，この教訓を科学的素材として，世界的に共有することの大切さを実感した。事故の示す技術的検討課題や政治的・管理的問題は別として，この事故の環境等への影響については，その要点を記した私のメモを次頁に示すが，これらのキーワードについても，人々はひとつひとつ冷静に直視し，事故のもたらした全体的評価を行う必要があると感じた。

チェルノビル原子力発電所の事故影響に関するメモ

大気中への放射能放出：50～300MCi
（12×10^{18}Bq：2%濃縮U燃料230tの約3%）
数日間上から約5,000ｔの防災化学物質投下して鎮火。
シェルター内に2,000万Ciが残存，炉内に水3,000tあり。
地域住民：プリピヤチ市などから135,000人が避難，
Chernobyl Exclusion Zone（2000km^2*） 55,000人が居住
* ベラルーシを入れると4,000km^{2}になる。
汚染地域：松林・牧草地
30km圏内に0.15MCiの^{137}Cs, 0.12MCiの^{90}Sr,
1,000Ciの^{240}Puが推定確認
30km圏外のナロジッチでも100Ci/km^{2}の汚染地域もある。
>37kBq（1μCi）/m^{2}は56,000km^{2}以上
>185kBq（5μCi）/m^{2}の地域に44万人が居住
>250mSvを被曝して緩和措置を受けた人は20万人以上
介入措置：
>1,480kBq（40μCi）/m^2—移住強制
555～1,480（15～40μCi）/m^2—移住強制，30ルーブル毎月支給
185～555kBq（5～15μCi）/m^2—移住任意
37～555（1～15μCi）/m^2—15ルーブル毎月支給
石棺作業者：
3国全体で60万人。ロシアでは17.5万人従事（先頃，ショイグ大臣がその25万人中3万人死に5万人が廃質と発言，しかし，当局の調査に基づくものではない）
人体影響：
>100万人が現在も汚染地帯に住んでいて，生涯総被曝線量は0.005～0.150Gy程度と推定される。13年後の現在も白血病その他の癌の過剰発生は見られていない。
しかし小児の甲状腺癌は例外で注目すべきである。3国で16万人の子供が被曝。甲状腺組織線量は0.2～3.2Gyで，事故初日の^{131}I被曝が小児の甲状腺異常の発生に最も効いた。事故後超音波検査で診断。
女:男=1.64で女児に多い。甲状腺腫:甲状腺癌＝10:1で，甲状腺癌は約1,800人いる。甲状腺癌は一般に非致死性で転移はリンパ腺に留まることが多い。現在でも12万人の子供のうち2,600人が甲状腺異常，地域ではゴメルが多く最大５%にみられる。甲状腺腫（Goiter）は尿中沃素の低い地域で多く発生。
生態系への影響：
キエフ周辺には1,300種以上の植物があるが，チェルノビル周辺の13種が危機にある。その周辺の396種の脊椎動物の内48種も危機にさらされたリストにある。

松原メモ2000.11.30

出典：日本原子力学会誌　2002年2月号　161～201頁
「チェルノブイリ原発から15年－私たちが学んだこと」
佐藤一男、山下俊一ほか


NASHIM